

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Diplomová práce

2016

Bc. David Merfort

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Realizace a zhodnocení možností rychlé polohové
regulace hydraulických systémů**

**Realisation and Evaluation of Fast Positioning
Control of Hydraulic Systems**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Merfort**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: Realizace a zhodnocení možností rychlé polohové regulace
hydraulických systémů
Realisation and Evaluation of Fast Positioning Control of Hydraulic
Systems

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Firma Ingeteam a.s. má v rámci školicího střediska k dispozici pracoviště osazené hydraulickými prvky. Úkolem diplomové práce je navrhnout a realizovat regulační struktury pro dostatečně rychlé řízení polohy hydraulických regulačních systémů, zhodnotit a porovnat použité regulační struktury a přístupy.

Body zadání:

1. Teoretický rozbor hydraulických systémů a jejich nároků na řízení vzhledem k požadované rychlosti regulace.
2. Rozbor regulačních struktur a prostředků nutných k jejich realizaci.
3. Realizace regulační struktury polohové regulace v PLC klasicky a s využitím isochronního módu sběrnice Profibus DP.
4. Realizace polohové regulace s využitím regulační karty firmy Rexroth.
5. Otestování realizací polohové regulace a jejich porovnání.
6. Návrh a realizace vizualizace řídicího systému.
7. Zhodnocení, diskuze dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KALANI, Ghodrat. *Industrial process control: advances and applications*. Boston: Butterworth-Heinemann, c2002, xiii, 182 s. ISBN 0-7506-7446-6.
- [2] MÜLLER, Jürgen, Frank NEUMANN a Bernd PFEIFFER. *Controlling with SIMATIC: practice book for SIMATIC S7 and SIMATIC PCS7 control systems*. Erlangen: Publicis, c2005, 162 s. ISBN 3-89578-255-6.
- [3] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, iv, ii, 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- [4] KAMEL, Khaled a Eman KAMEL. *Programmable logic controllers: industrial control*. New York: McGraw-Hill Education, c2014, x, 419 s. ISBN 978-0-07-181045-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.



.....
Bc. David Merfort

Datum odevzdání diplomové práce: 28. 4. 2016

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá řízením polohy soustavy hydraulických válců prostřednictvím programovatelného automatu Simatic. V práci je provedena analýza reálné soustavy a nároků na řízení této soustavy. Byl vytvořen model soustavy v Simulinku prostřednictvím toolboxu SimHydraulics. Tento model tvoří základ pro linearizaci soustavy a syntézu regulátoru. Linearizace byla provedena pomocí Hammersteinova modelu, kdy se nelineární statická charakteristika linearizovala její inverzní funkcí. Pro řízení soustavy byl zvolen konvenční PID regulátor, přičemž k ladění konstant regulátoru byl použit nástroj PID tuner v Matlabu. Řídicí program byl napsán v prostředí STEP7 s ohledem na softwarové standardy firmy Ingeteam a.s., v jejichž středisku se reálná soustava nachází. Jako SCADA systém bylo použito WinCC firmy Siemens. V závěru práce je vyhodnocení výsledků při aplikaci na reálné soustavě. Jedná se o porovnání dvou proporcionálních ventilů s rozdílným typem řízení, zhodnocení přínosu linearizace, porovnání několika regulátoru, srovnání řízení při různých dobách vzorkování a srovnání regulace prostřednictvím cyklického přerušení a s využitím isochronního režimu sběrnice Profibus DP.

Klíčová slova: Automatizace, PLC, Simatic, Vizualizace, STEP7, WinCC, Matlab, Model, Linearizace, PID

Abstract

This thesis deals with position control of hydraulic cylinders via Simatic programmable controller. This work includes analysis of the real system and control requirements of the real system. Model of the system was created in Simulink with the use of toolbox SimHydraulics. This model forms the basis for the linearization of the system and synthesis of the controller. Linearization was performed using a Hammerstein model, when a non-linear static characteristic was linearized by its inverse function. For control of the system was chosen conventional PID controller, when the constants of the controller was tuned by PID tuner in Matlab. The control program was made in STEP7 with respect to software standards of the Ingeteam company, where the hydraulic system is located. As a SCADA system was used WinCC by Siemens. In conclusion, results was applied and verified to the real system. It was a comparison of two proportional valves with different types of control, contribution of linearization, comparison of regulators, comparison of control with different times of sampling and comparison of regulation by cyclic interruption and using isochronous mode of Profibus DP.

Keywords: Automation, PLC, Simatic, Visualization, STEP7, WinCC, Matlab, Model, Linearization, PID

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
Seznam ilustrací	3
Seznam tabulek	6
1. Úvod	8
2. Teoretický rozbor hydraulických systémů a jejich nároků na řízení	9
2.1 Popis reálné hydraulické soustavy	9
2.2 Popis hydraulické části systému	12
2.2.1 Blok hydraulické stanice	12
2.2.1.1 Snímače hladiny a teploty	12
2.2.1.2 Chladicí okruh	14
2.2.1.3 Ohřev	16
2.2.1.4 Filtr	17
2.2.1.5 Čerpadlo	19
2.2.1.6 Blok hydraulických ventilů	21
2.2.2 Řídicí hydraulické prvky	22
2.2.2.1 Blok dvoucívkového ventilu YV4	22
2.2.2.2 Blok proporcionálního ventilu YV2	24
2.2.2.3 Blok proporcionálního ventilu YV3	28
2.2.3 Soustava hydraulických válců	30
2.2.3.1 Snímání polohy pístu hydraulického válce	30
2.2.3.2 Levý, prostřední a pravý hydraulický válec	31
3. Model soustavy	33
3.1 Model hydraulické stanice	33
3.1.1 Model indukčního motoru	34
3.1.2 Model čerpadla	36
3.1.3 Doplnění modelu hydraulické stanice	38
3.2 Model řídicích hydraulických prvků	40
3.2.1 Model proporcionálního ventilu	40
3.2.1.1 Statické vlastnosti proporcionálního ventilu	40
3.2.1.2 Dynamické vlastnosti proporcionálního ventilu	44
3.3 Model soustavy hydraulických válců	46
3.3.1 Model hydraulického válce	46
3.3.2 Aktualizace modelu řídicích hydraulických prvků	53
3.3.2.1 Změna typu parametrizace proporcionálního ventilu	55
4. Linearizace soustavy	60
4.1 Hammarsteinův model	60
4.2.1 Statická charakteristika modelu	61
4.2.2 Identifikace lineární dynamické části modelu	64
5. Analýza regulačních smyček soustavy a syntéza regulátoru	67
5.1 Model soustavy hydraulických válců	67
5.2 Rozbor PID regulátoru vyvinutého firmou Ingeteam a.s.	68
5.3 Ladění konstant regulátoru	72

5.3.1	Nástroj Matlabu PID Tune	73
6.	Řídicí systém	76
6.1	Vzdálená periferie ET200S	77
7.	Řídicí program	79
7.1	Programovací standardy firmy Ingeteam a.s.	79
7.2	Skupina hydraulické stanice (HS)	80
7.3	Skupina hydraulické ventily a válce (HSV)	88
7.4	Isochronní režim sběrnice Profibus DP	95
7.4.1	Programování OB synchronního cyklického přerušení	96
8.	Vizualizace	98
8.1	Tag management	98
8.2	Tag logging	99
8.3	Alarm logging	100
8.4	Interlocky	101
8.5	Graphics designer	101
9.	Zhodnocení výsledků	107
9.1	Porovnání ventilu s integrovanou řídicí elektronikou a ventilu s řídicí elektronikou na kartě Rexroth	107
9.2	Posouzení vlivu linearizace statické charakteristiky	108
9.3	Porovnání regulátorů při řízení reálné soustavy	109
9.4	Porovnání regulace reálné hydraulické soustavy při různých dobách cyklu OB35	110
9.5	Porovnání regulace prostřednictvím OB35 a pomocí isochronního režimu sběrnice Profibus DP (OB61)	111
10.	Závěr	112
	Seznam použité literatury	114
	Seznam příloh	117

Seznam použitých zkratk a symbolů

A – větší komora hydraulického válce
AI – Analog Input
B – menší komora hydraulického válce
CPU – Central Processing Unit
CSV – Comma Separated Values
DB – Data Block
DI – Digital Input
 dm^3 – decimetr krychlový
 dm^3/min – decimetr krychlový za minutu
DO – Digital Output
Er – Error
FB – Function Block
FBD – Function Block Diagram
FC – Function
GS – Generátor Signálů
HMI – Human Machine Interface
HS – skupina Hydraulická Stanice
HSV – skupina Hydraulické Soustava Válců
HW – Hardware
I – Input
I/O – Input/Output
ITAE – Integral of Time-weighted Absolute Error
l/min – litr za minutu
LAD – Ladder diagram
mA – miliampér
mm – milimetr
NW – Network
OB – Organization Block
P – Pressure
PC – Personal Computer
PID – Proporconální, Integrační a Derivační regulátor
PIP – Process Image Partition
PIW – Peripheral Input Word
PLC – Programmable Logic Controller
PM – Power Module
 p_{max} – maximální pracovní tlak
Profibus DP – Process field bus Decentralized Periphery
Profinet – Process field net
PSD – Proporconální, Sumační a Diferenční regulátor
PV – Process Value
Q – Output
 Q_v – objemový průtok

R – Regulátor
S – Soustava
SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition
SCL – Structured Control Language
SFC – System function
SP – Set-point
SQL – Structured Query Language
STL – Statement list
T – return
TCP/IP – Transmission Control Protocol/Internet
UDT – User-defined Data Type
V – volt
°C – stupeň Celsia
 Ω – ohm

Seznam ilustrací

Obr. 1: Blokové schéma typického hydraulického systému. [1].....	9
Obr. 2: Zjednodušené blokové schéma hydraulické soustavy.....	11
Obr. 3: Fotografie reálné hydraulické soustavy.	11
Obr. 4: Blokové schéma hydraulické stanice	12
Obr. 5: Kombinované zařízení pro snímání hladiny a teploty. [6].....	13
Obr. 6: Schéma chladicího okruhu. [5]	15
Obr. 7: Vlevo: tlaková ztráta filtru v závislosti na průtoku při $v = 35 \text{ mm}^2/\text{s}$. Vpravo: tlaková ztráta filtru v závislosti na kinematické viskozitě při konstantním průtoku. [8].....	18
Obr. 8: Schematická značka filtru. [8]	18
Obr. 9: Schéma zapojení čerpadla v hydraulické stanici.....	19
Obr. 10: Schéma bloku hydraulických ventilů.....	21
Obr. 11: Blokové schéma řídicích hydraulických prvků v návaznosti na ostatní části hydraulického okruhu.	22
Obr. 12: Schéma bloku dvoucívkového ventilu YV4.	23
Obr. 13: Závislost průtoku na velikosti řídicího signálu a vyznačení některých obecných vlastností proporcionálních ventilů. [12].....	25
Obr. 14: Schéma bloku proporcionálního ventilu YV2	25
Obr. 15: Blokové schéma řídicí elektroniky ventilu YV2 [13]	26
Obr. 16: Převod proudového signálu na napěťový signál.	27
Obr. 17: Blokové schéma řídicí karty Rexroth VT-VRPA2-1-11/V0/T5[15]	28
Obr. 18: Řídicí karta Rexroth VT-VRPA2-1-11/V0/T5.[14].....	29
Obr. 19: Blokové schéma hydraulických válců v závislosti na jiných částech hydraulické soustavy. .	30
Obr. 20: Schematická značka dvojčinného válce s jednostrannou pístnicí	31
Obr. 21: Model indukčního motoru v Simulinku.	34
Obr. 22: Elektrické parametry modelu indukčního motoru.....	35
Obr. 23: Parametry napájení indukčního motoru.	35
Obr. 24: Mechanické parametry indukčního motoru.	35
Obr. 25: Model čerpadla s proměnlivým geometrickým objemem a s kompenzací výstupního tlaku. 36	
Obr. 26: Parametry modelu čerpadla.....	37
Obr. 27: Model čerpadla ve schématu pro sestavení průtočné charakteristiky čerpadla.	37
Obr. 28: Průtočná charakteristika modelu čerpadla.	38
Obr. 29: Parametry hydraulických vedení, jež spojují hydraulickou stanici s řídicími hydraulickými prvky.	39
Obr. 30: Model hydraulické stanice.	39
Obr. 31: Průtočná charakteristika proporcionálního ventilu.	40
Obr. 32: Komponenta 4/3 ventilu v SimHydraulics.....	41
Obr. 33: Parametrizace 4/3 ventilu v SimHydraulics.....	42
Obr. 34: Nastavení parametrů pro počáteční otevření ventilu.....	42
Obr. 35: Schéma v Simulinku pro testování parametrizovaného ventilu.....	43
Obr. 36: Průtočná charakteristika modelu proporcionálního ventilu.	43
Obr. 37: Přechodová charakteristika regulace polohy šoupátka proporcionálního ventilu uvedená v katalogovém listu výrobce.	44

Obr. 38: Přechodová charakteristika přenosu získaného aproximací přechodové charakteristiky Strejcovou metodou.	45
Obr. 39: Parametry modelu dvojčinného hydraulického válce.	46
Obr. 40: Připojení modelu hydraulického válce k mechanickým prvkům představujícím zátěž válce.	47
Obr. 41: Model hydraulického systému s jedním válcem.	48
Obr. 42: Model hydraulické stanice.	49
Obr. 43: Porovnání naměřeného průběhu aktuální pozice pístu s průběhem simulovaným před odhadem parametrů.	50
Obr. 44: Porovnání naměřeného průběhu aktuální pozice pístu s průběhem simulovaným po odhadu parametrů.	51
Obr. 45: Průběh změny odhadovaných parametrů v závislosti na aktuální iteraci nástroje Parameter estimation.	52
Obr. 46: Porovnání modelu soustavy s reálnou soustavou při saturaci akčního zásahu úrovní 0.7 vlevo a 0.3 vpravo.	54
Obr. 47: Fotografie hydraulických prvků, které nejsou součástí modelu.	54
Obr. 48: Připojení lokálního odporu k modelu hydraulického ventilu.	55
Obr. 49: Schéma pro optimalizaci a porovnání výsledků při změně typu parametrizace proporcionálního ventilu.	56
Obr. 50: Porovnání průtočné charakteristiky modelů před optimalizací.	56
Obr. 51: Průběh optimalizace.	57
Obr. 52: Porovnání průtočné charakteristiky modelů po optimalizaci.	57
Obr. 53: Porovnání modelu soustavy s reálnou soustavou při saturaci akčního zásahu úrovní 0.7 vlevo a 0.3 vpravo po korekci modelu ventilu.	58
Obr. 54: Porovnání diferenčního tlaku v komorách B a A před korekcí parametrů proporcionálního ventilu. Měření i simulace byla provedena při saturaci akčního zásahu úrovní 0.3.	59
Obr. 55: Porovnání diferenčního tlaku v komorách B a A po korekci parametrů proporcionálního ventilu. Měření i simulace byla provedena při saturaci akčního zásahu úrovní 0.3.	59
Obr. 56: Struktura Hammersteinova modelu. [30]	60
Obr. 57: Eliminace vlivu indukčního motoru nahrazením ideálního zdroje otáček.	61
Obr. 58: Aproximace statické charakteristiky hydraulické soustavy s použitím nástroje Curve Fitting Tool.	62
Obr. 59: Průběh funkce, jež linearizuje statickou charakteristiku soustavy.	63
Obr. 60: Statické charakteristika hydraulické soustavy po linearizaci.	63
Obr. 61: Průběh vstupního a výstupního signálu hydraulické soustavy.	64
Obr. 62: Přechodová charakteristika při použití modelu integrační soustavy.	65
Obr. 63: Přechodová charakteristika při použití modelu integrační soustavy se setrvačností.	66
Obr. 64: Hammersteinův model hydraulické soustavy.	66
Obr. 65: Struktura regulačního obvodu.	67
Obr. 66: Struktura PID regulátoru firmy Ingeteam a.s.	69
Obr. 67: Obrázek bloku PID ve Step7.	70
Obr. 68: Ovládání PID regulátoru prostřednictvím vizualizace.	72
Obr. 69: Schéma pro srovnání různých regulátorů.	73
Obr. 70: Ukázka použití nástroje PID Tuner.	74

Obr. 71: Porovnání regulátorů typu P (s povoleným překmitem), PD při povoleném překmitu a P (bez překmitu).	74
Obr. 72: Porovnání jednotlivých regulátorů na modelu, jež byl vytvořen pomocí toolboxu SimHydraulics.	75
Obr. 73: Blokové schéma řídicího systému. [16] [17] [18] [19] [20]	76
Obr. 74: HW konfigurace řídicího systému.	76
Obr. 75: Pohled na vnitřní uspořádání rozvaděče.	77
Obr. 76: Výpis UDT1000 – žádané hodnoty skupiny hydraulická stanice.	80
Obr. 77: Petriho síť znázorňující význam jednotlivých inbterlocků.	83
Obr. 78: Ukázka implementace interlocku pro chod skupiny hydraulická stanice.	84
Obr. 79: Ukázka použití bloku digitálního měření DgMeas.FB.	87
Obr. 80: Ukázka rozhraní statických proměnných bloku DgMeas.FB.	88
Obr. 81: Ukázka implementaci bloku generátoru signálu.	90
Obr. 82: Ukázka použití bloku SubVlvBiPropFdb.FB.	94
Obr. 83: Časová struktura isochronního režimu. [34]	95
Obr. 84: Konfigurace konstantní doby cyklu sběrnice.	96
Obr. 85: Výměna dat v OB synchronního cyklického přerušení. [32]	96
Obr. 86: Struktura OB61 – synchronní cyklické přerušení.	97
Obr. 87: Seznam některých strukturovaných datových typů použitých ve WinCC.	98
Obr. 88: Tagy strukturovaného typu AnMeasSts-UDT.	99
Obr. 89: Elementy struktury AnMeasSts-UDT.	99
Obr. 90: Ukázka alarmů.	100
Obr. 91: Statusy poruch ve WinCC.	100
Obr. 92: Ikony jednotlivých interlocků.	101
Obr. 93: Ukázka interlocku pro start skupiny HS.	101
Obr. 94: Hlavní obrazovka 202_HYD pro ovládání hydraulické soustavy.	102
Obr. 95: Obrazovka 203_ChrtLCyl s grafy levého hydraulického válce.	103
Obr. 96: Ukázka použitých faceplate objektů ve WinCC.	104
Obr. 97: Faceplate objekt čerpadla a změna jeho vzhledu v závislosti na aktuálním stavu čerpadla.	105
Obr. 98: Vlastnosti instance faceplate objektu DgMeas.	105
Obr. 99: PopUp (vyskakovací obrazovka) objektu analogového měření.	106
Obr. 100: Porovnání přechodových charakteristik ventilů s různými typy řízení.	107
Obr. 101: Průběh regulačního děje reálné soustavy bez použití FB pro linearizaci.	108
Obr. 102: Průběh regulačního děje reálné soustavy s použitím FB pro linearizaci.	108
Obr. 103: Porovnání regulátorů na reálné soustavě.	109
Obr. 104: Porovnání regulace reálné hydraulické soustavy při různých dobách cyklu OB35.	110
Obr. 105: Porovnání regulace pomocí OB35 a prostřednictvím isochronního režimu sběrnice Profibus DP (OB61).	111

Seznam tabulek

Tab. 1: Seznam signálů snímačů hladiny a teploty.	13
Tab. 2: Seznam signálů aktuátorů chladicího okruhu.	15
Tab. 3: Seznam zpětných vazeb spínacích prvků chladicího okruhu.	16
Tab. 4: Seznam signálů aktuátorů ohřevu.	17
Tab. 5: Seznam zpětných vazeb spínacích prvků ohřevu.	17
Tab. 6: Seznam signálů filtru.	19
Tab. 7: Seznam signálů pro řízení hlavního čerpadla.	20
Tab. 8: Seznam zpětných vazeb spínacích prvků hlavního čerpadla.	20
Tab. 9: Seznam signálů bloku hydraulických ventilů.	22
Tab. 10: Seznam signálů pro řízení ventilu YV4.	23
Tab. 11: Seznam signálů snímače pro měření tlaku.	24
Tab. 12: Tabulka signálů ventilu YV2.	27
Tab. 13: Tabulka signálů snímačů tlaku bloku proporcionálního ventilu YV2.	27
Tab. 14: Tabulka signálů ventilu YV3.	29
Tab. 15: Tabulka signálů snímačů tlaku bloku proporcionálního ventilu YV3.	29
Tab. 16: Tabulka signálů snímačů polohy pístu.	31
Tab. 17: Jednotlivé průtoky odečtené z průtočné charakteristiky uvedené v katalogovém listu výrobce. Průtoky jsou uvedeny v litrech za minutu.	41
Tab. 18: Stanovení řádu n aproximační soustavy a zpřesnění polohy inflexního bodu.	45
Tab. 19: Přehled odhadovaných parametrů a jejich hodnoty před a po odhadu.	51
Tab. 20: Průběh hodnoty ztrátové funkce v závislosti na číslu iterace.	53
Tab. 21: Experimentálně zvolené parametry proporcionálního ventilu.	55
Tab. 22: Parametry proporcionálního ventilu získané optimalizací.	57
Tab. 23: Parametry modelu proporcionálního ventilu po ruční korekci.	58
Tab. 24: Parametry funkce statické charakteristiky hydraulické soustavy.	62
Tab. 25: Seznam vstupů bloku PID regulátoru.	71
Tab. 26: Seznam parametrů regulátoru nastavovaných prostřednictvím vizualizace.	71
Tab. 27: Porovnání jednotlivých regulátorů.	75
Tab. 28: HW konfigurace vzdálené periferie ET200S.	78
Tab. 29: FB vyvinuté firmou Ingeteam a.s. použité v řídicím programu hydraulické soustavy.	79
Tab. 30: Pomocné bloky vyvinuté firmou Ingeteam a.s. použité v řídicím programu hydraulické soustavy.	79
Tab. 31: Žádané hodnoty skupiny hydraulická stanice.	81
Tab. 32: Příkazy skupiny hydraulická stanice.	81
Tab. 33: Stav skupiny hydraulická stanice.	82
Tab. 34: Stav skupiny hydraulická stanice.	82
Tab. 35: Interlocky pro start skupiny hydraulická stanice.	83
Tab. 36: Interlocky pro chod skupiny hydraulická stanice.	84
Tab. 37: Prvky použité ve skupině hydraulická stanice.	86
Tab. 38: Žádané hodnoty skupiny HSV.	89
Tab. 39: Příkazy skupiny HSV.	90
Tab. 40: Stav skupiny HSV.	91

Tab. 41: Přehled prvků skupiny HSV	93
Tab. 42: Seznam hlavních obrazovek ve WinCC.....	102
Tab. 43: Seznam použitých objektů faceplate ve WinCC.....	104

1. Úvod

Hydraulické pohony jsou vzhledem ke svým vlastnostem v současném průmyslu velmi využívány. Mají velmi dobrý poměr rozměry/výkon, a proto jsou velmi často využívány v těžkém průmyslu. Zpočátku bylo využívání hydraulických mechanismů spojováno především s konstrukcemi hydraulických lisů. S postupem času však pronikly hydraulické systémy do všech odvětví průmyslu. Jednou z mnoha výhod hydraulických systémů je možnost jednoduché realizace přímočarých pohybů prostřednictvím hydraulických válců.

V současné době se uplatňuje především elektronické ovládání hydraulických systémů, což umožňuje plně automatický provoz daného zařízení. V současných aplikacích se velmi často využívá moderní proporcionální technika a servotechnika, která umožňuje plynulou regulaci hydraulických pohonů. Tyto zařízení umožňují vyhovět požadavkům současného průmyslu na vysokou přesnost a rychlost pohybů hydraulických pohonů. Toho se využívá při konstrukcích nejrůznějších manipulátorů a robotických zařízení, jež výrazně zefektivňují výrobu.

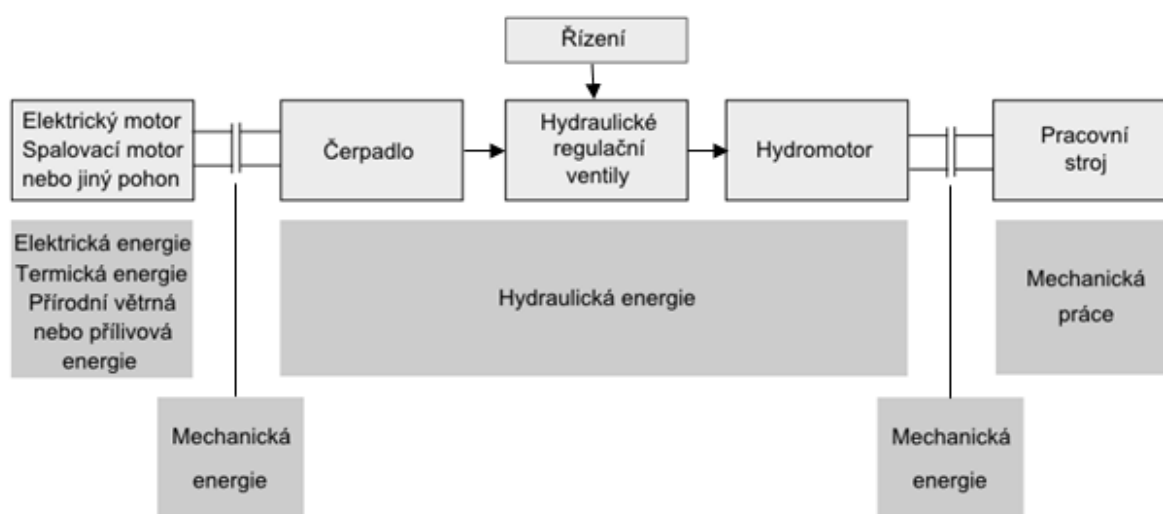
Přímočaré hydraulické pohony jsou nejčastěji regulovány na požadovanou polohu, rychlost nebo tlak. Regulace ve většině případů spočívá v řízení průtoku a směru toku hydraulické kapaliny, skrze hydraulický ventil. Ventil pak následně reguluje průtok a směr toku hydraulické kapaliny k hydraulickému pohonu, který mění hydraulickou energii na energii mechanickou. K řízení hydraulických proporcionálních ventilů a servoventilů se velmi často využívají konvenční PID regulátory. Ty umožňují efektivně vyrovnávat průběh aktuální veličiny podle nastavené hodnoty žádané veličiny a omezují vliv poruchové veličiny uplatňující se v systému. Tyto konvenční PID regulátory budou využívány k regulaci polohy hydraulických válců v této diplomové práci.

Hydraulické systémy se uplatňují v nejrůznějších průmyslových aplikacích. Účel aplikace hydraulických systémů není většinou vždy stejný. V různých aplikacích se uplatňují konfigurace různých hydraulických prvků a je nutné navrhnout řídicí systém v závislosti na dané technologii, podle níž se také implementuje řídicí algoritmus. Jako řídicích systémů se v průmyslu velmi hojně využívá techniky programovatelných automatů (PLC). Tato technika je vhodná pro nasazení i v náročných průmyslových aplikacích. Současná PLC umožňují i implementovat regulační PID algoritmus, vhodný pro řízení hydraulických válců. PLC jsou většinou distribuované systémy, což umožňuje snadnou rozšiřitelnost celého systému.

V současné době je nutné, aby operátoři strojů mohli do systému zasahovat a tím uzpůsobili chování systému k aktuální situaci. Operátoři mohou měnit parametry řídicího systému, zjišťovat poruchy systému, zahájit nebo ukončit činnost systému, kontrolovat správný chod systému a mnoho dalších činností, které jsou nezbytné k efektivnímu provozu dané technologie. K zajištění těchto činností se v průmyslu nejčastěji používají HMI/SCADA systémy. Je to softwarový nástroj, který umožňuje prostřednictvím výpočetní techniky komunikovat s řídicím systémem. Pomocí tohoto softwaru lze vytvořit přehlednou vizualizaci systému, kterou budou poté operátoři využívat k obsluze dané technologie.

2. Teoretický rozbor hydraulických systémů a jejich nároků na řízení

Hydraulický systém obsahuje zařízení, které využívají tekutinu k přenosu energie. Na vstup hydraulické soustavy se přivádí mechanická energie, která pohání hydrogenerátor. Nejčastěji je pro pohon hydrogenerátoru použit elektrický nebo spalovací motor. Hydrogenerátor mění mechanickou energii na kinetickou a tlakovou energii kapaliny. Podle konstrukčního uspořádání se hydrogenerátory dělí na zubová, šroubová, lamelová, radiální pístová a axiální pístová. Hydraulická kapalina je v hydraulickém obvodu řízena prostřednictvím hydraulických ventilů, které řídí směr, tlak a průtok hydraulické kapaliny hydraulickým systémem. Hydraulická energie je pro řízení a regulaci vhodnější, než energie mechanická. Řízená a regulovaná hydraulická kapalina podle aktuálního nastavení hydraulických prvků pak následně působí na hydromotor, které přeměňuje hydraulickou energii na energii mechanickou.



Obr. 1: Blokové schéma typického hydraulického systému. [1]

Hydraulické systémy jsou postaveny na základech hydromechaniky. V hydraulických systémech jsou uplatňovány zákony hydrostatiky a hydrokinematiky. Hydrostatika se zabývá chováním tekutin, které se vzhledem k vymezenému prostoru nepohybují. Cílem hydrostatiky je především výpočet tlaků a sil na plochy a tělesa. Využívá aplikace Pascalova zákona a Eulerovy rovnice hydrostatiky. Hydrokinematika popisuje dynamické účinky kapalin a zabývá se prouděním kapalin a plynů. Využívá především aplikace Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity průtoku. [2]

2.1 Popis reálné hydraulické soustavy

Hydraulická soustava se nachází ve školicím středisku firmy Ingeteam a.s. Soustava je určena ke školení z oblasti hydraulických systémů a k testování a odladění řídicích algoritmů pro řízení hydraulických systémů. Hydraulická soustava firmy Ingeteam a.s. je rozdělena do několika bloků. Hydraulická část soustavy se skládá ze tří hlavních bloků.

Prvním blokem soustavy je hydraulická stanice. Na vstup hydraulické stanice je přiveden zdroj elektrické energie, která je prostřednictvím asynchronního motoru převedena na mechanickou energii, která pohání čerpadlo, jež energii mechanickou přeměňuje na energii kapaliny. Tlak hydraulické kapaliny za čerpadlem kolísá, a proto je tlak regulován prostřednictvím redukčního ventilu na konstantní hodnotu tlaku. Dalším úkolem hydraulické stanice je filtrace nečistot v hydraulickém oleji. Je-li hydraulický olej znečištěn, je více namáháno čerpadlo, roste teplota systému a tím pádem vznikají nežádoucí tepelné a energetické ztráty. Další důležitou činností hydraulické stanice je zajištění optimální teploty hydraulické kapaliny. Teplota hydraulické kapaliny má vliv na viskozitu hydraulické kapaliny. Ta je v hydraulických obvodech klíčová a zajišťuje dostatečné mazání hydraulických prvků a efektivní přenos výkonu v soustavě. Nedílnou součástí hydraulické stanice je rychlé zajištění odpojení hlavního hydraulického vedení od zdroje tlaku v případě poruchy nebo z bezpečnostních důvodů. Pro tyto účely hydraulická stanice obsahuje pojistný ventil, který po aktivaci přepouští hydraulickou kapalinu z čerpadla zpět do nádrže. V pracovním hydraulickém vedení pak nebude působit hydraulická energie tvořená čerpadlem, což je jeden z předpokladů pro zajištění bezpečnosti v hydraulických systémech.

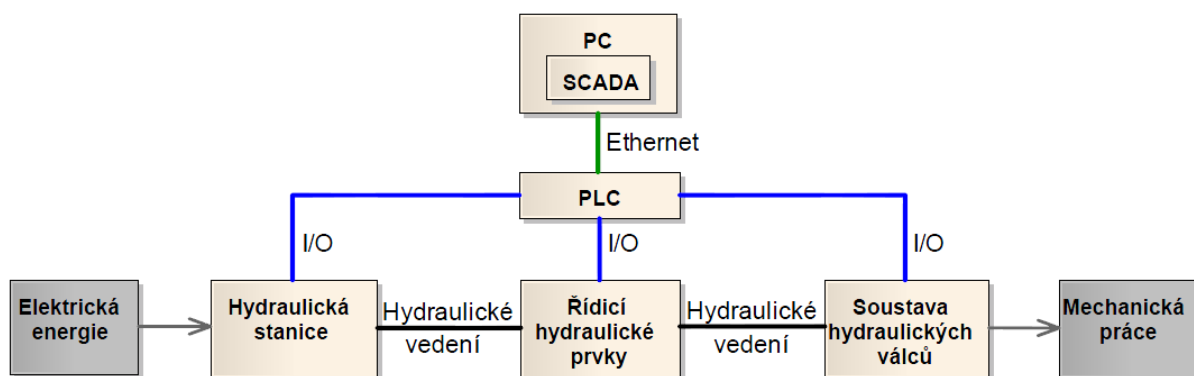
Dalším blokem v hydraulické soustavě jsou řídicí hydraulické prvky. Na vstup tohoto bloku je pracovním hydraulickým vedením přiveden konstantní tlak z hydraulické stanice. Zpětným vedením je pak hydraulická kapalina odváděna do nádrže, kde je atmosférický tlak. Řídicí hydraulické prvky slouží k řízení směru, průtoku a tlaku hydraulické kapaliny. Hodnoty těchto veličin jsou tedy ovlivňovány parametry hydraulických prvků a aktuální polohou šoupátek a jiných částí uvnitř řídicích hydraulických prvků. Poloha šoupátka je řízena elektrickým signálem produkovaným řídicím systémem. Jedná se o unifikovaný napěťový nebo proudový signál. Na výstupu z tohoto bloku proudí hydraulická kapalina požadovaným směrem a o žádaném průtoku a tlaku.

Poslední hydraulickou částí v hydraulické soustavě je soustava hydraulických válců. Na vstup tohoto bloku je hydraulickým vedením A a B přivedena hydraulická kapalina řídicích hydraulických prvků. V soustavě se vyskytují tři přímočaré dvoucestné hydraulické válce. Ty přeměňují hydraulickou energii na energii mechanickou, která vykonává mechanickou práci. Hydraulický válec je jednoduché dvoukomorové zařízení, kde obě komory jsou odděleny pístem, který je pevně spojen s pístnicí. Jestliže v jedné komoře je tlak odlišný od tlaku v komoře druhé, pístnice s pístem se pohybují a vykonávají mechanickou práci. Při vyrovnání tlaků v obou komorách pohyb ustane.

Všechny tyto hydraulické bloky jsou řízeny prostřednictvím PLC. Jedná se o řídicí systém, který prostřednictvím unifikovaných elektrických signálů řídí hydraulickou soustavu. Tento systém je distribuovaný a hydraulická soustava je řízena decentralizovanou periferií, která prostřednictvím průmyslové sběrnice komunikuje s hlavní řídicí jednotkou. Decentralizovaná periferie obsahuje moduly digitálních a analogových I/O. K těmto modulům jsou připojeny signály z komponent hydraulické soustavy. Některé prvky jsou propojeny přímo, např. poloha šoupátka proporcionálního ventilu je řízena unifikovaným signálem přímo z analogového výstupního modulu. Některé prvky jsou ovládány prostřednictvím spínací techniky, která je řízena prostřednictvím PLC. Například modul digitálních výstupů ovládá cívku stykače, který spíná silový okruh pro napájení elektromotoru, který pohání hydraulické čerpadlo. PLC obsahuje program, kterým je hydraulická soustava řízena. Program obsahuje logiku pro řízení aktuátorů, dále obsahuje PID algoritmy pro výpočet akční veličiny pro nastavení polohy šoupátek proporcionálních ventilů, obsluhuje signály ze snímačů, reaguje na události

vyvolané obsluhou prostřednictvím vizualizačního systému, diagnostikuje hydraulickou soustavu, kontroluje správný chod soustavy, reaguje na poruchy soustavy a vykonává spoustu dalších nezbytných i doplňujících činností spojených s řízením hydraulické soustavy.

Na vyšší úrovni řízení hydraulické soustavy se nachází SCADA systém. Je to softwarový nástroj nainstalovaný na standardním nebo průmyslovém PC. Obsluha hydraulické soustavy prostřednictvím SCADA systému komunikuje s PLC, které hydraulickou soustavu přímo řídí. PC, na kterém je SCADA systém nainstalován je s řídicím PLC propojen prostřednictvím ethernetu.



Obr. 2: Zjednodušené blokové schéma hydraulické soustavy.



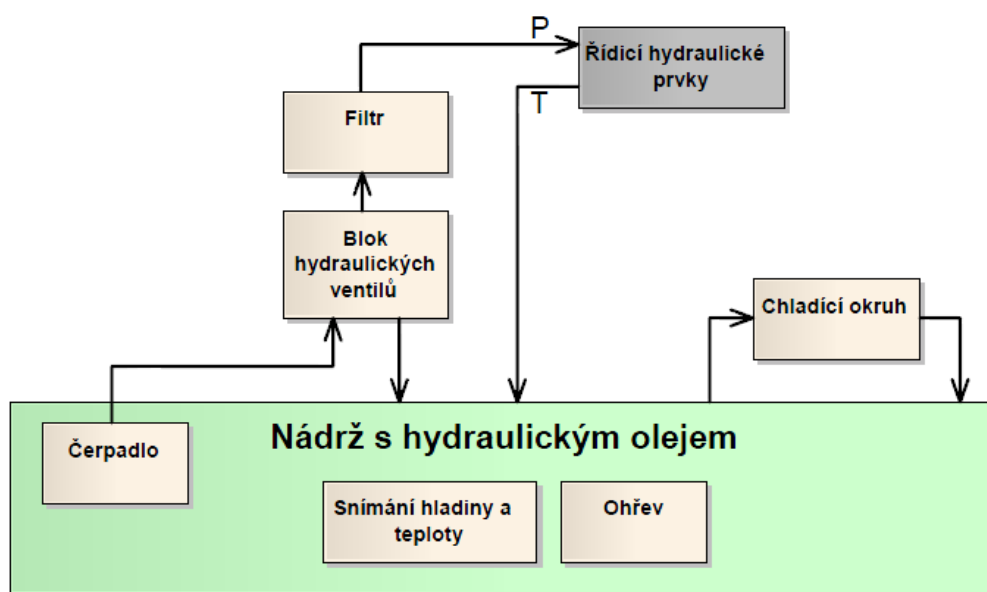
Obr. 3: Fotografie reálné hydraulické soustavy.

2.2 Popis hydraulické části systému

V této podkapitole budou podrobněji popsány principy, způsob řízení a základní vlastnosti hydraulických komponent použitých ve skutečné soustavě. Podkapitola je rozdělena do tří částí, které odpovídají blokovému dělení částí soustavy z předchozí podkapitoly.

2.2.1 Blok hydraulické stanice

Jednou z hlavních činností hydraulické stanice je zajištění konstantní hodnoty tlaku v pracovním vedení, pro použití v dalších částech hydraulického systému. Další důležitou činností hydraulické stanice je zajištění optimálních vlastností hydraulické kapaliny, i přes působení různých rušivých vlivů na hydraulickou kapalinu. Hydraulická stanice použitá v soustavě, umístěné ve firmě Ingeteam a.s, je dimenzována na maximální pracovní tlak $p_{\max} = 5 \text{ MPA}$ a objemový průtok $Q_V = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$. Jako hydraulická kapalina v soustavě je použit hydraulický olej HLP ISO VG 46. Objem nádrže pro hydraulický olej činí 100 dm^3 . Na obr. 3 je vidět blokové schéma hydraulické stanice.



Obr. 4: Blokové schéma hydraulické stanice

2.2.1.1 Snímače hladiny a teploty

Jedním z důležitých požadavků na řízení hydraulických soustav, je udržování optimální teploty hydraulického oleje. Při nízké nebo naopak při příliš vysoké teplotě, dochází k rychlejší degradaci kvality hydraulického oleje, což může vést až k poškození některých hydraulických prvků. Dále je důležité indikovat, zda je hydraulický olej přítomen a zda je v požadovaném minimální množství. Spuštění čerpadla bez přítomnosti hydraulického oleje může vést k jeho poškození.

Princip činnosti Snímání hladiny a teploty

K snímání hladiny a teploty se využívá snímače, který je umístěn v nádrži, kde se vyskytuje většina hydraulického oleje. Snímač je napájen a generuje signály, jež vstupují do řídicího systému, který tyto signály zpracuje a vyhodnotí.

Popis zařízení

V nádrži je umístěno zařízení vyráběné firmou Bühler s označením Nivotemp NT M-XP, které v sobě kombinuje snímač teploty a snímač hladiny. Zařízení má dva výstupní unifikované proudové signály v rozsahu 4 – 20 mA. Jeden signál odpovídá aktuální teplotě hydraulického oleje v nádrži a druhý signál odpovídá výšce hladiny oleje v nádrži. Teplotu lze měřit v rozsahu -20 °C až 120 °C. Teplotní rozsah je však nastavitelný, proto je vhodné interval rozsahu teplot omezit pouze na maximální a minimální možné teploty hydraulického oleje. Signál teploty a výšky hladiny jsou přímo zapojeny do modulu analogových vstupů periferie ET200S. Dále zařízení obsahuje čtyři programovatelné digitální výstupy, přičemž dva z nich je možné nastavit jako frekvenční výstupy.



Obr. 5: Kombinované zařízení pro snímání hladiny a teploty. [6]

Tab. 1: Seznam signálů snímačů hladiny a teploty.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Hladina oleje	4 - 20 mA	PIW114	word	Teplotní rozsah: 0 – 100 °C
Teplota oleje	4 - 20 mA	PIW112	word	Rozsah hladin: 0 – 280 mm
Spínač hladiny	0; 24V	I0.0	bool	Nastaven na výšku hladiny: 80 mm
Spínač teploty	0; 24V	I0.1	bool	Nastaven na teplotu: 65 °C

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Analogový signál aktuální teploty a hladiny jsou zpracovány blokem pro analogové měření. Výstupem z bloku je hodnota signálu v požadovaných jednotkách. Teplota ve °C a výška hladiny v mm. V bloku analogového měření se definují hodnoty signálu pro úroveň varování a alarmů. Hodnota teploty bude využita pro řízení chladicího okruhu a ohřevu. Hodnotou výšky hladiny budou blokovány některé hydraulické prvky soustavy.

Pro programovatelné digitální výstupy snímače bude použit blok pro digitální měření, jež zpracovává signály na digitálních vstupech. Ze snímače máme k dispozici signál minimální hladiny hydraulického oleje a maximální teploty hydraulického oleje. Tyto signály mohou sloužit pro zdvojení činnosti analogových signálů. Například při přerušeném vedení analogového snímače hladiny, zastoupí jeho činnost blokování spuštění čerpadla signál přivedený na digitální vstup. Tyto signály mohou sloužit například i pro další, ještě nižší (vyšší) úroveň alarmů.

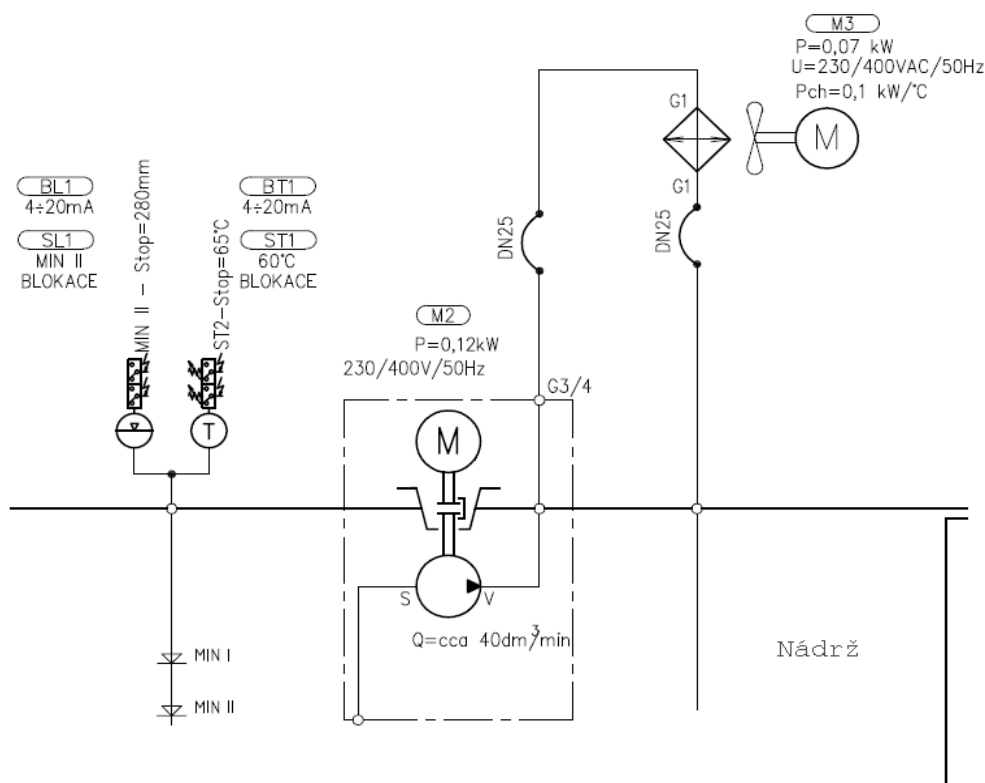
2.2.1.2 Chladicí okruh

Teplota hydraulického oleje je jedním z faktorů, který významně ovlivňuje stav hydraulického oleje, ale i chod celého hydraulického systému. Vysoká teplota oleje způsobuje jeho oxidaci. Za optimální provozní teplotu hydraulických olejů se většinou považuje teplota 45 °C. Podle Arrheinova zákona se s každým nárůstem teploty o 10 °C zdvojnásobuje rychlost procesu oxidace. V případě vysokého namáhání hydraulického systému dochází k rychlému nárůstu provozní teploty hydraulického oleje, což vede k jeho rychlé degradaci. Jestliže nedojde k odstranění nečistot z hydraulického systému, začnou se nečistoty usazovat na stěnách hydraulických prvků a nabalují na sebe další nečistoty. V případě nečistot v hydraulickém oleji dochází i například k většímu namáhání čerpadla. To má za následek růst teploty čerpadla, čímž opět dochází k rychlejší oxidaci hydraulického oleje. Dodržování optimální teploty oleje má výrazný vliv na bezporuchovost i ekonomiku provozu hydraulického systému. [3] [4]

Princip činnosti chladicího okruhu

Systém chlazení se nachází z části uvnitř a z části na nádrži s hydraulickým olejem. Chladicí systém obsahuje jednosměrné neregulační čerpadlo (označení), které zajišťuje proudění hydraulického oleje skrze chladicí okruh. Hydraulické čerpadlo je poháněno standardním asynchronním trojfázovým motorem. Hydraulická kapalina je čerpadlem tlačena přes hliníkový chladič, který odebírá část tepla hydraulického oleje. Chladič je ochlazován okolním vzduchem a zároveň ventilátorem. Ochlazený hydraulický olej pak následně putuje zpět do nádrže.

Čerpadlo chladicího okruhu není využito jen k účelu chlazení hydraulické kapaliny. Čerpadlo slouží rovněž k cirkulaci hydraulického oleje v nádrži.



Obr. 6: Schéma chladicího okruhu. [5]

Popis zařízení

Chladicí okruh obsahuje dva aktuátory. Jedná se o dva asynchronní trojfázové motory. První motor pohání čerpadlo chladicího okruhu a druhý motor pohání ventilátor pro chlazení hydraulického oleje. Motory jsou spínány třífázovým stykačem s ovládací cívkou 230 V. Cívka tohoto stykače je ovládána spínacími kontakty elektromagnetického relé. Cívka tohoto relé je ovládána digitálním výstupem z decentralizované periferie ET200S. Motory jsou jištěny motorovými spouštěči s nastavitelným vypínacím proudem.

Tab. 2: Seznam signálů aktuátorů chladicího okruhu.

Popis	Adresa	Datový typ	Komentář
Motor čerpadla	Q1.1	bool	Ovládání cívky elmag. relé
Ventilátor	Q1.2	bool	Ovládání cívky elmag. relé

Součástí chladicího okruhu jsou čtyři zpětné vazby, jež indikují, že je příslušný spínací prvek sepnut. Dvě zpětné vazby indikují sepnutý motorový spouštěč, jež jistí napájecí přívod pro čerpadlo a ventilátor a další dvě zpětné vazby indikují sepnuté stykače u obou motorů. Zpětné vazby jsou připojeny k modulu digitálních vstupů periferie ET200S.

Tab. 3: Seznam zpětných vazeb spínacích prvků chladicího okruhu.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
M2 čerpadlo zapnuto	0; 24 V	I1.1	bool	Pomocný kontakt stykače
M3 ventilátor zapnut	0; 24 V	I1.2	bool	Pomocný kontakt stykače
M2 motor starter OK	0; 24 V	I2.1	bool	Pomocný kontakt (vypínání 0.45 A)
M3 motor starter OK	0; 24 V	I2.2	bool	Pomocný kontakt (vypínání 0.28 A)

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Po zapnutí hydraulické stanice se sepne pohon M2 (cirkulační čerpadlo). V případě, že nebude signál ze zpětných vazeb motorstartéru na úrovni log. 1, chladicí okruh přejde do stavu poruchy. Dojde-li k odstranění poruchové situace, obsluha potvrdí poruchy a systém chladicího okruhu přejde do stavu připraven.

Je-li systém připraven a překročí-li teplota oleje hodnotu 45 °C, zapne se ventilátor M3. Klesne-li teplota oleje pod hodnotu 42 °C, vypne ventilátor a systém přejde zpět do stavu připraveno.

Je-li systém v chodu a nebude-li mít pozitivní některou zpětnou vazbu od stykačů nebo motorových spouštěčů, přechází systém do stavu porucha. Konkrétní hodnoty teplot byly zvoleny pouze z důvodů demonstrace principu řízení. Tyto teploty bude možné nastavit z Vizualizace.

2.2.1.3 Ohřev

Stejně jako vysoká teplota, tak i nízká teplota může poškodit hydraulický systém. Nízká teplota hydraulického oleje má za následek zvýšení viskozity hydraulického oleje. Většinou k nízké teplotě hydraulického oleje dochází z důvodů umístění hydraulického systému ve venkovních prostorách. U velmi nízkých teplot může dojít i ke ztrátě tekutosti. Vysoká viskozita hydraulického oleje může způsobit: zvýšené namáhání čerpadel, ztrátu mazacích schopností, špatnou funkci hydraulických prvků, zvýšení odporu v potrubích, blokování filtrů... [7]

Princip činnosti ohřevu

K ohřevu hydraulického oleje se využívá topného tělesa umístěného v nádrži s hydraulickým olejem.

Popis zařízení

Pro ohřev hydraulického oleje se využívá jednoho aktuátoru, topného tělesa. Topné těleso má výkon 1kW a je napájeno trojfázově s využitím zapojení do hvězdy. Topné těleso je spínáno třífázovým stykačem s ovládací cívkou 230 V. Cívka tohoto stykačem je ovládaná spínacími kontakty

elektromagnetického relé. Cívka tohoto relé je ovládána digitálním výstupem z decentralizované periferie ET200S. Topné těleso je jištěno třífázovým jističem s charakteristikou C a vypínacím proudem 6 A.

Tab. 4: Seznam signálů aktuátorů ohřevu.

Popis	Adresa	Datový typ	Komentář
Topné těleso	Q1.3	bool	Ovládání cívky elmag. relé

Ke snímání teploty hydraulického oleje se využívá snímač Nivotemp NT M-XP, jež je popsán v předchozí podkapitole. Adresy a popis signálu jsou uvedeny v tab. 1.

Součástí ohřevu jsou dvě zpětné vazby, jež indikují sepnutí příslušného spínacího prvku. První zpětná vazba je od jističe a druhá od stykače. Zpětné vazby jsou připojeny k modulu digitálních vstupů periferie ET200S.

Tab. 5: Seznam zpětných vazeb spínacích prvků ohřevu.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Stykač top. tělesa	0; 24 V	I1.3	bool	Pomocný kontakt stykače
Jistič top. tělesa OK	0; 24 V	I2.3	bool	Pomocný kontakt jističe

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Po zapnutí hydraulické stanice bude topné těleso vypnuto. Pokud bude pomocný kontakt jističe signalizovat na digitálním vstupu vypnutý jistič a zároveň bude teplota hydraulického oleje nad 40 °C, přejde systém ohřevu do stavu varování. Bude-li jistič vypnut a teplota klesne pod 40 °C, přejde systém do režimu poruchy. Při sepnutém jističi bude systém pokračovat v automatickém řízení. V případě, že snímač teploty hydraulického oleje naměří teplotu nižší než 40 °C, topné těleso se zapne. Po dosažení teploty 42 °C se topné těleso vypne. Takto cyklicky se bude zapínat a vypínat topné těleso v automatickém režimu systému. Při zapnutém topném tělesu bude i signál z pomocného kontaktu stykače přivedený na digitální vstup v úrovni log. 1. Při vypnutém topném tělesu bude signál samozřejmě v úrovni log. 0. Systém přejde do stavu poruchy, jestliže se úroveň signálu na digitálním výstupu pro sepnutí topného tělesa a signálu z pomocného kontaktu stykače nebudou shodovat. Samozřejmě je uvažováno mírné zpoždění signálu na DI, oproti signálu z DO.

2.2.1.4 Filtr

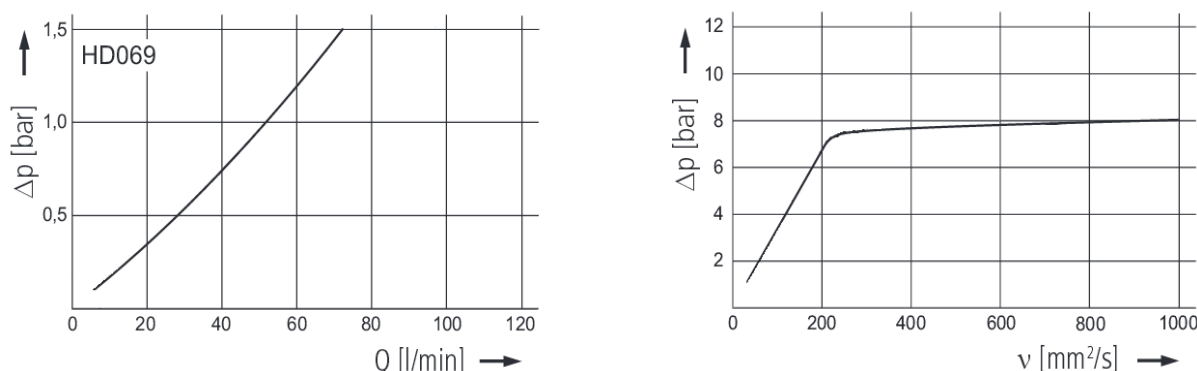
Filtr je v hydraulických obvodech důležitý pro spolehlivou funkci a dlouhou životnost hydraulických prvků. Filtr v hydraulickém obvodu slouží k odstranění mechanických nečistot z hydraulického oleje, jež bývají jedním z nejčastějších zdrojů poruch v hydraulických obvodech.

Princip činnosti filtru

Filtr je umístěn v tlakovém potrubí za čerpadlem. Toto zapojení je vhodné pro jemnou filtraci nečistot. Výhodou je filtrace nečistot již před vstupem do citlivých hydraulických prvků.

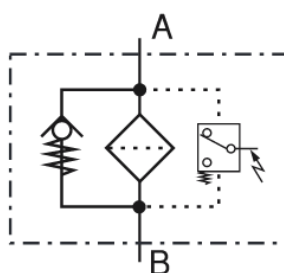
Popis zařízení

V zařízení je použit filtr HD069-159 firmy ARGO-HYTOS. Jedná se o vysokotlaký filtr pro vestavbu do potrubí. Jmenovitý průtok filtru je do 60 l/min. Tlaková ztráta filtru závisí na průtoku a na kinematické viskozitě.



Obr. 7: Vlevo: tlaková ztráta filtru v závislosti na průtoku při $\nu = 35 \text{ mm}^2/\text{s}$. Vpravo: tlaková ztráta filtru v závislosti na kinematické viskozitě při konstantním průtoku. [8]

Součástí filtru je obtokový ventil s otevíracím tlakem 7 bar. Dále je filtr vybaven elektronickým snímačem, který indikuje znečištění filtru. To je obsaženo i ve schematické značce filtru na obr. 8.



Obr. 8: Schematická značka filtru. [8]

Indikace znečištění filtru je důležitá pro ideální načasování výměny filtrační vložky. Při pozdní výměně filtrační vložky dochází ke zbytečně velké tlakové ztrátě filtru a příliš brzká výměna je ekonomicky nevýhodná. Signál indikující znečištění filtru je přiveden na kartu digitálních vstupů.

Tab. 6: Seznam signálů filtru.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Indikace znečištění filtru	0; 24 V	I0.2	bool	Log. 0 – Filtr znečištěn

Požadavky na funkčnost řídicího programu

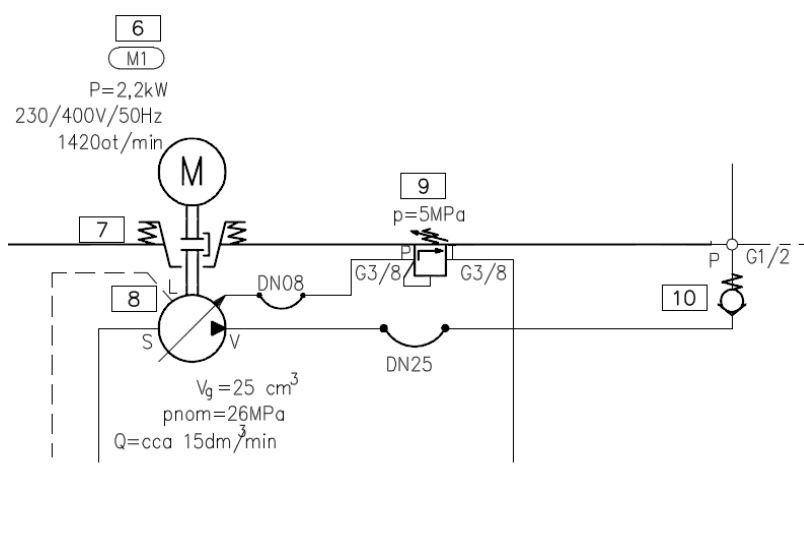
V případě přítomnosti log. 1 na digitálním vstupu indikující znečištění filtru, bude systém signalizovat stav, že filtr je v pořádku. V opačném případě systém zobrazí varování, že je filtr znečištěn a vyzve obsluhu k výměně filtrační vložky. Pokud bude signál v úrovni log. 0 a nedojde k výměně filtrační vložky po dobu předem stanoveného času, přejde systém do stavu poruchy.

2.2.1.5 Čerpadlo

Hydraulické čerpadlo mění mechanickou energii přivedenou na vstup čerpadla na energii kapaliny. Zdrojem mechanické energie bývá většinou motor, nejčastěji spalovací nebo elektrický. Existuje několik druhů čerpadel, které se dělí podle konstrukce na: zubové, lamelové a pístové. Spojení čerpadla a motoru musí být provedeno spojkou, která vyloučí přenášení axiálních a radiálních sil na hřídel čerpadla.

Popis zařízení

V hydraulické stanici je umístěno axiální pístové čerpadlo s proměnným geometrickým objemem LRR025 od firmy Sauer. Čerpadlo je regulováno ventilem č. 9 na konstantní výstupní tlak. Čerpadlo je poháněno asynchronním elektromotorem FCA100LA firmy Motor-Gear s výkonem 2,2 kW. Čerpadlo je s elektromotorem spojeno spojkou. Za čerpadlem v tlakovém vedení je umístěn jednocestný ventil, jež zabraňuje změně směru proudění hydraulické kapaliny. Čerpadlo je schopno dodávat maximální tlak 5 MPa a objemový průtok $15 \text{ dm}^3/\text{min}$.



Obr. 9: Schéma zapojení čerpadla v hydraulické stanici.

Elektromotor, jež pohání hydrogenerátor, je spínán pomocí zařízení Simocode Pro V. Simocode je elektronická procesorová jednotka s odnímatelnými proudovými transformátory, doplněná komunikačním rozhraním, 4 digitálními vstupy a 3 reléovými výstupy pro spínání motorových stykačů. [9]

Vlastnosti Simocode:

- Ochrana motorů proti přetížení - měření protékajícího proudu.
- Vstup pro termistory ve vinutí.
- Nastavení vypínací charakteristiky.
- Nastavení citlivosti na výpadek fáze.
- Nastavitelné proudové hodnoty pro zablokovaný rotor a pro odlehčený pohon.
- Komunikace prostřednictvím sběrnice Profibus DP (Diagnostika, řízení...).
- Digitální vstupy, reléové výstupy i obsah telegramu v Profibusu lze propojit logickými vazbami v řídicím systému.
- Možnost přechodu mezi manuálním a dálkově řízeným režimem.

Tab. 7: Seznam signálů pro řízení hlavního čerpadla.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Hlavní čerpadlo	0; 24 V	Q1.0	bool	Ovládání cívky elmag. relé

Tab. 8: Seznam zpětných vazeb spínacích prvků hlavního čerpadla.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Stykač hlavního čerpadla	0; 24 V	I1.0	bool	Pomocný kontakt stykače
Jistič hlavního čerpadla	0; 24 V	I2.0	bool	Pomocný kontakt jističe

Požadavky na funkčnost řídicího programu

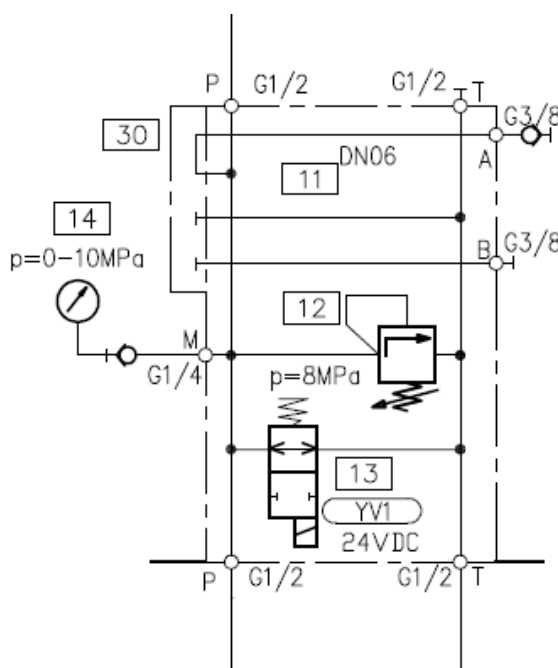
Po zapnutí skupiny hydraulické stanice se nejdříve na nastavený čas sepne cirkulační čerpadlo M2. Po nastaveném čase se sepne hlavní čerpadlo M1. Hlavní čerpadlo po nějakém čase začne do obvodu dodávat maximální možný tlak. V tomto čase dojde k povolení operací, jež umožní operovat s ventily a tím pádem i hydromotory. Činnost čerpadla je blokována několika signály. Jedná se o nízkou hladinu hydraulického oleje, nízkou a vysokou teplotu oleje. Blok motoru kontroluje, zdali je čerpadlo napájeno prostřednictvím zpětné vazby jističe. V případě, že není, blok čerpadla přejde do poruchového stavu. Blok dále kontroluje zpětnou vazbu od stykače. V případě, že se logická úroveň zpětné vazby neshoduje s logickou úrovní na digitálním výstupu, blok čerpadla rovněž přejde do poruchy.

2.2.1.6 Blok hydraulických ventilů

Ventily v hydraulických obvodech slouží zejména pro řízení průtoku, tlaku nebo pro změnu proudění hydraulické kapaliny. Ventily mohou být řízeny mechanicky, elektricky, hydraulicky nebo pneumaticky. Pro oblast automatizace jsou předmětem zájmu elektricky řízené ventily. Nedílnou součástí většiny hydraulických obvodů jsou hydraulicky řízené ventily. Například přepouštěcí ventil přepouští přebytečné množství tlakové kapaliny zpět do nádrže a tím chrání hydraulický obvod před přetížením. Tento ventil není potřeba cyklicky řídit, stačí pouze ručně nastavit na ventilu požadovanou hodnotu tlaku.

Popis zařízení

Ve spodní části schématu na obr. 11 je přívod kapaliny od čerpadla a odtok kapaliny do nádrže. Přívod k filtru a následně k hydromotorům je znázorněn v horní části schématu. Pojistný ventil označením 12 slouží k omezení maximálního dodávaného tlaku do obvodu. Tlak dodávaný čerpadlem je 5 MPa. Pojistný ventil je nastaven na 8 MPa. Je tedy zřejmé, že se ventil začne otevírat jen v případě poruchy čerpadla a tím ochrání hydraulické prvky před vysokým tlakem.



Obr. 10: Schéma bloku hydraulických ventilů.

S označením 13 na schématu je umístěn elektromagnetem ovládaný, dvoucestný, dvupolohový ventil. Je-li ventil v klidové poloze, kapalina dodávaná hydrogenerátorem proudí zpět do nádrže s hydraulickým olejem, a proto není do hydromotorů dodávána žádná energie. Poloha ventilu je řízena digitálním výstupem řídicího systému. V případě log. 1 (24 V) na digitálním výstupu je dodáván tlak do systému, v případě log. 0 se hydraulická kapalina vrací zpět do nádrže.

Tab. 9: Seznam signálů bloku hydraulických ventilů.

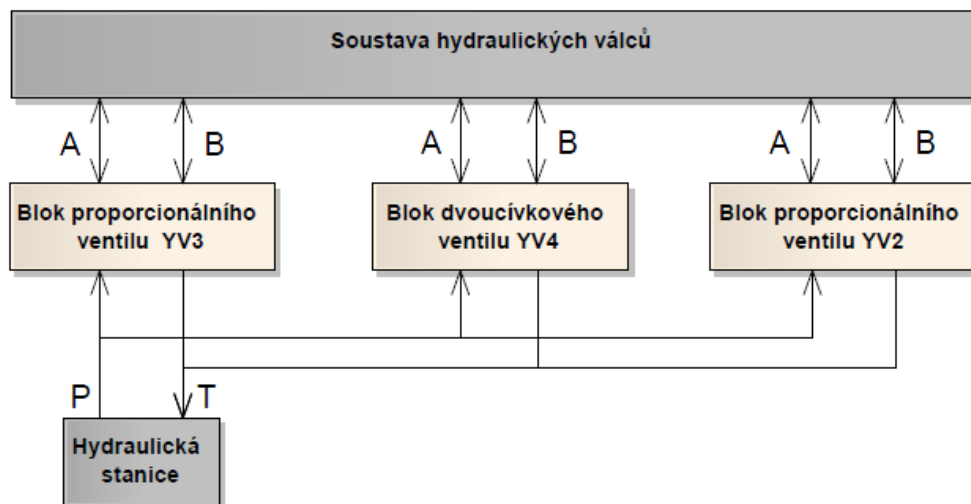
Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Ventil YV1	0; 24 V	Q0.0	bool	Log. 1 – Tlak je dodáván do systému

Požadavky na funkčnost řídicího programu

V případě zapnutí sekce hydraulické stanice se sepne i ventil YV1. Bude-li bezpečnostní okruh v pořádku a budou-li povoleny operace, zůstane ventil YV1 sepnut. Poruší-li se bezpečnostní okruh, například centrálním total-stop tlačítkem nebo dojde k zákazu vykonávání operací, například z důvodů příliš vysoké teploty, signál na digitálním výstupu přejde do úrovně log. 0 a do systému není dodáván tlak.

2.2.2 Řídicí hydraulické prvky

Soustava ventilů je umístěna mezi hydraulickou stanicí (zdrojem tlaku) a soustavou hydraulických ventilů (spotřebitelem tlakové energie). Ventily řídí směr, průtok a tlak, který hydraulická stanice dodává do soustavy hydraulických válců. V této části hydraulické soustavy jsou umístěny tři hydraulické ventily, jež jsou řízeny elektricky. Každý ventil je řídí jeden hydraulický válec. V následujících podkapitolách jsou rozpracovány jednotlivé ventily.



Obr. 11: Blokové schéma řídicích hydraulických prvků v návaznosti na ostatní části hydraulického okruhu.

2.2.2.1 Blok dvoucívkového ventilu YV4

Pro jednodušší mechanismy, kdy není nutné cyklicky řídit průtok hydraulické kapaliny ventilem, postačuje pro řízení polohy pístu použití například čtyřcestného, třípolohového ventilu. Tímto

ventilem však není možné řídit rychlost pístu, ale pouze jeho pozici. Pro regulační úlohy, kdy jsou kladeny vyšší požadavky na kvalitu regulace a na průběh regulované veličiny, není tento typ ventilu vhodný.

Popis zařízení

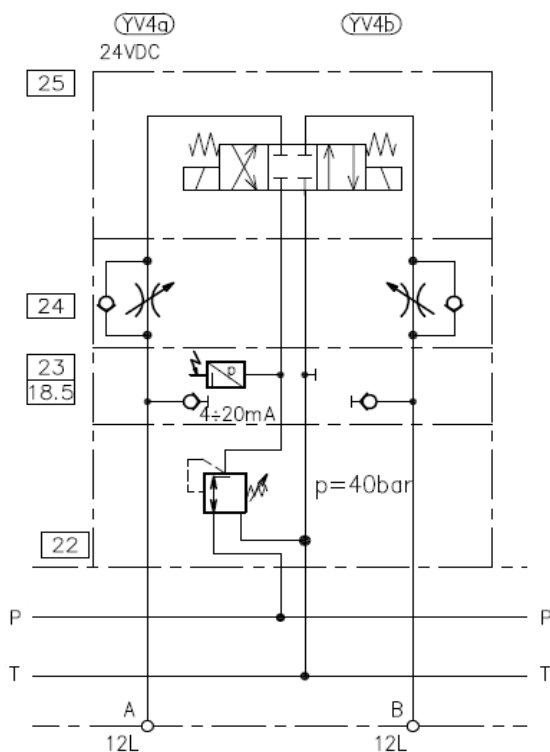
V hydraulické soustavě je pro řízení hydraulického válce použit čtyřcestný, třípolohový ventil RPE3-063Z11 firmy Argo-Hytos. Jedná se o dvou cívkový ventil, jehož cívky jsou ovládány elektromagnetem. Ve středové poloze jsou všechny porty ventilu uzavřeny. Tím je umožněno udržování pístu válce ve zvolené poloze, což je zapříčiněno tlakovou aretací. [10]

Cívky snímače jsou připojeny na kartu digitálních výstupů řídicího systému. Každou cívku ovládá jeden digitální výstup.

Tab. 10: Seznam signálů pro řízení ventilu YV4.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
YV4a	0; 24 V	Q0.1	bool	Ventil zatížení páky nahoru
YV4b	0; 24 V	Q0.2	bool	Ventil zatížení páky dolů

Schematická značka ventilu je patrná z obr. 12 (označení 25), který znázorňuje schéma bloku ventilu YV4.



Obr. 12: Schéma bloku dvoucívkového ventilu YV4.

Označení P je tlakový přívod z čerpadla a T je zpětné vedení do nádrže. A a B jsou označení pro vedení k hydraulickému válci. Cívky ventilu jsou označeny YV4a a YV4b. Na výstupech z ventilu YV4 jsou umístěny škrtkící - zpětné ventily s označením 24. Jsou to nastavitelné škrtkící ventily, jejich rychlost průtoku závisí na viskozitě. Tyto ventily zapříčiní snížení rychlosti pohybu pístu hydraulického válce.

Blok ventilu YV4 obsahuje snímač pro měření tlaku. Snímač měří tlak v rozsahu 0 – 413.7 bar. Snímač má proudový výstup, dvou vodičový, v rozsahu 4 – 20 mA. Snímač nese označení 625-T4-16-P9 a je vyráběn firmou Barksdale. Snímač měří tlak pouze v tlakovém vedení.

Tab. 11: Seznam signálů snímače pro měření tlaku.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Tlakový snímač BP5	4 – 20 mA	PIW108	word	Tlak zatížení prostředního válce

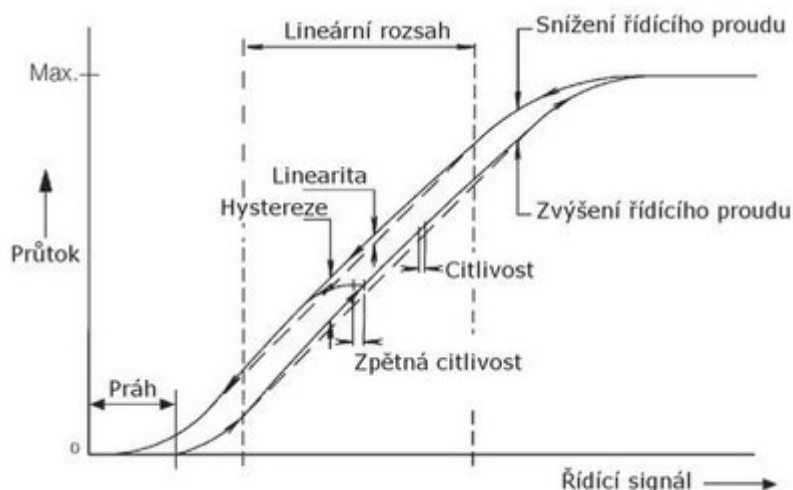
V bloku s označením 22 je umístěn trojcestný, redukční ventil. Snižuje tlak na úroveň 40 bar a tuto hodnotu udržuje.

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Bude-li hydraulická stanice v provozu a bude-li signalizovat stav, že je připravena, bude uvolněno ovládání ventilu YV4. V ručním režimu ventilu bude možné spínat cívky ventilu prostřednictvím tlačítek ve vizualizaci a tím dosáhnout požadované pozice pístu hydraulického válce. V automatickém režimu se bude ventil řídit podle definovaných požadavků na pohyb pístu válce. V případě porušení bezpečnostního okruhu se okamžitě ventil přestaví do středové pozice (signály na digitálních výstupech budou v úrovni log. 0) a tím se zastaví pohyb pístu hydraulického válce. V tomto stavu setrvá, dokud obsluha neodstraní příčinu porušení bezpečnostního okruhu a následně nepotvrdí odstranění příčiny ve vizualizaci. Hodnota tlaku bude zaznamenávána do grafu, pro pozdější možnou analýzu.

2.2.2.2 Blok proporcionálního ventilu YV2

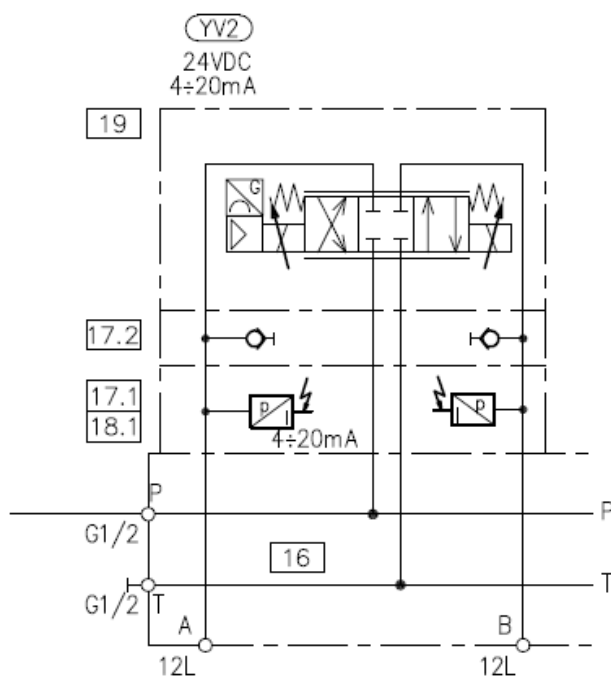
Proporcionální ventily slouží pro regulaci průtoku a směru proudění hydraulické kapaliny. Velmi často se uplatňují jako akční člen ve zpětnovazebních regulačních obvodech. Umožňují plynulou změnu průtoku v závislosti na požadavcích systému. Působením elektrického signálu na cívku dochází k vychylování šoupátka a tím je docíleno změny průtoku ventilem. Většina ventilů je vybavena řídicí jednotkou, která převádí vstupní elektrický signál (0 – 10 V, 4 – 20 mA, 0 – 20 mA) na šířkově modulovaný pulzní proud, který přímo ovládá cívku ventilu. Některé ventily mohou být vybaveny snímačem polohy šoupátka. Mezi hlavní vlastnosti, jimiž se jednotlivé proporcionální ventily od sebe odlišují, patří: průtokové charakteristiky, linearita, hystereze, citlivost a opakovatelnost. [12]



Obr. 13: Závislost průtoku na velikosti řídicího signálu a vyznačení některých obecných vlastností proporcionálních ventilů. [12]

Popis zařízení

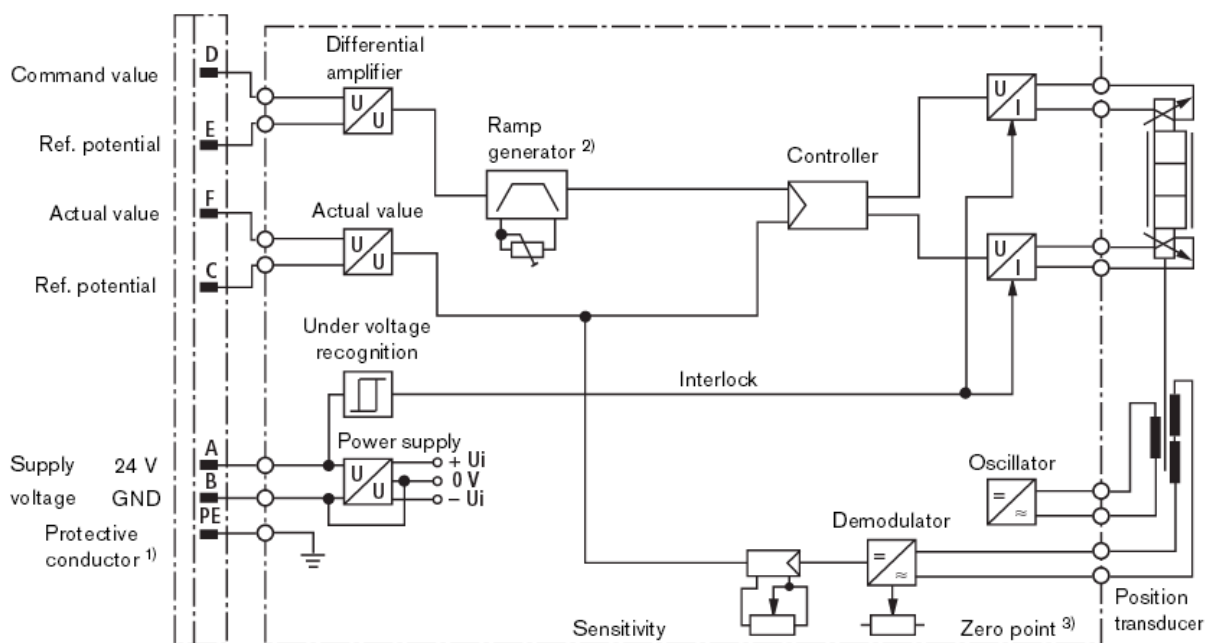
Označení YV2 nese ventil 4WREE 6 E16-2X od firmy Bosch-Rexroth. Jedná se o čtyřcestný, třípolohový proporcionální ventil, jež má v sobě integrovanou řídicí elektroniku. Ventil je vybaven elektrickou zpětnou vazbou od polohy šoupátka. Schéma bloku proporcionálního ventilu je znázorněno na obr. 14. [13]



Obr. 14: Schéma bloku proporcionálního ventilu YV2

Šoupátko ventilu je udržováno ve středové poloze prostřednictvím pružin. Tedy v případě, že na vstup ventilu není přiveden řídicí signál, je šoupátko ventilu udržováno ve středové poloze. Nulová poloha ventilu je mechanicky nastavitelná. [13]

Na vstup řídicí elektroniky je přiveden řídicí signál. Ten následně prochází blokem generátoru rampy. Ta je externě nastavitelná v rozsahu 0 – 2,5 s. Upravený signál je přiveden na vstup mikrokontroléru. Na další vstup mikrokontroléru je přiveden zpracovaný signál obsahující aktuální polohu šoupátka. Tento signál je rovněž vyveden ven z řídicí elektroniky pro potřeby nadřazených systémů. Mikrokontrolér obsahuje regulátor, na jehož vstup je přiveden rozdíl žádané a aktuální polohy šoupátka, který vypočte odpovídající akční zásah. Akční zásah je převeden z napětového signálu na pulzní proud, jenž působí na cívky ventilu a tím vychyluje pozici šoupátka. Regulátor zajistí minimální rozdíl mezi žádanou a aktuální polohou šoupátka ventilu. V případě detekce podpětí se činnost ventilu zablokuje. Blokové schéma řídicí elektroniky ventilu YV2 je znázorněno na obr. 15. [13]

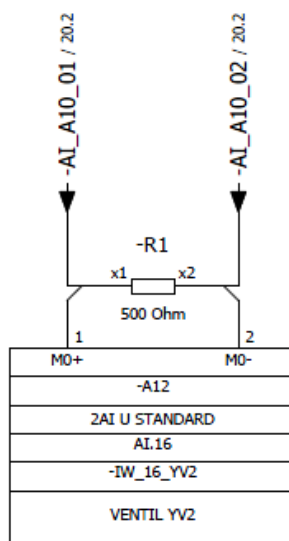


Obr. 15: Blokové schéma řídicí elektroniky ventilu YV2 [13]

Řídicí signál pro nastavení žádané polohy šoupátka ventilu je v rozsahu 4-20 mA. Při úrovni řídicího signálu 12 mA je šoupátko ventilu ve středové poloze a ventilem neproudí žádná hydraulická kapalina. Při řídicím signálu 20 mA proudí hydraulická kapalina maximálním průtokem ve směru z vedení P do A, a z B do T. Při signálu 4 mA proudí hydraulická kapalina maximálním průtokem ve směru z vedení P do B, a z A do T. Řídicí signál pro nastavení žádané polohy šoupátka je připojen ke kartě analogových proudových výstupů. [13]

Aktuální poloha šoupátka ventilu je rovněž v rozsahu 4-20 mA. Signál je však přiveden na kartu analogových napětových vstupů [13]. Z tohoto důvodu je nutné převést proudový signál na napětový. Nejjednodušší způsob, jak toho docílit, je paralelně ke vstupu měřící karty připojit rezistor o velikosti 500 Ω . Proudový signál se převede z proudového rozsahu 4-20 mA na rozsah 2-10 V. Při tomto řešení

se nevyužije plného rozsahu měřicí karty. Převod proudového signálu na napěťový je znázorněn na obr. 16.



Obr. 16: Převod proudového signálu na napěťový signál.

Tab. 12: Tabulka signálů ventilu YV2.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
YV2 – Žádaná pozice	4 – 20 mA	PQW100	word	Žádaná pozice šoupátka ventilu
YV2 – Aktuální pozice	2 – 10 V	PIW116	word	Aktuální pozice šoupátka ventilu

V bloku proporcionálního ventilu YV2 jsou umístěny dva snímače tlaku. Jsou umístěny mezi proporcionálním ventilem a hydraulický válec ve vedeních A a B. Umístění je patrné z obr. 14 (snímače nesou označení 17.1 a 18.1). Jedná se o stejný typ snímače, který je umístěn v bloku dvoucívkového ventilu YV4, který je popsán v kapitole 2.2.2.1.

Tab. 13: Tabulka signálů snímačů tlaku bloku proporcionálního ventilu YV2.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Tlakový snímač BP1	4 – 20 mA	PIW100	word	Tlak ve vedení A
Tlakový snímač BP2	4 – 20 mA	PIW102	word	Tlak ve vedení B

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Bude-li hydraulická stanice spuštěná a bude-li signalizovat povolení operací, uvolní se ovládání ventilu. Ventil YV2 ovládá pravý dvoucínny hydraulický válec. Ventil má dva režimy. První režim je

manuální, kdy pozici otevření ventilu zadává obsluha ručně z HMI. Druhý režim je automatický, kdy žádanou hodnotu otevření ventilu řídí nadřazený regulátor.

Program porovnává žádanou polohu šoupátka a skutečnou polohu. V případě, že budou po delší dobu tyto hodnoty rozdílné (s přihlédnutím k zvolenému pásmu necitlivosti), vyhlásí systém poruchu.

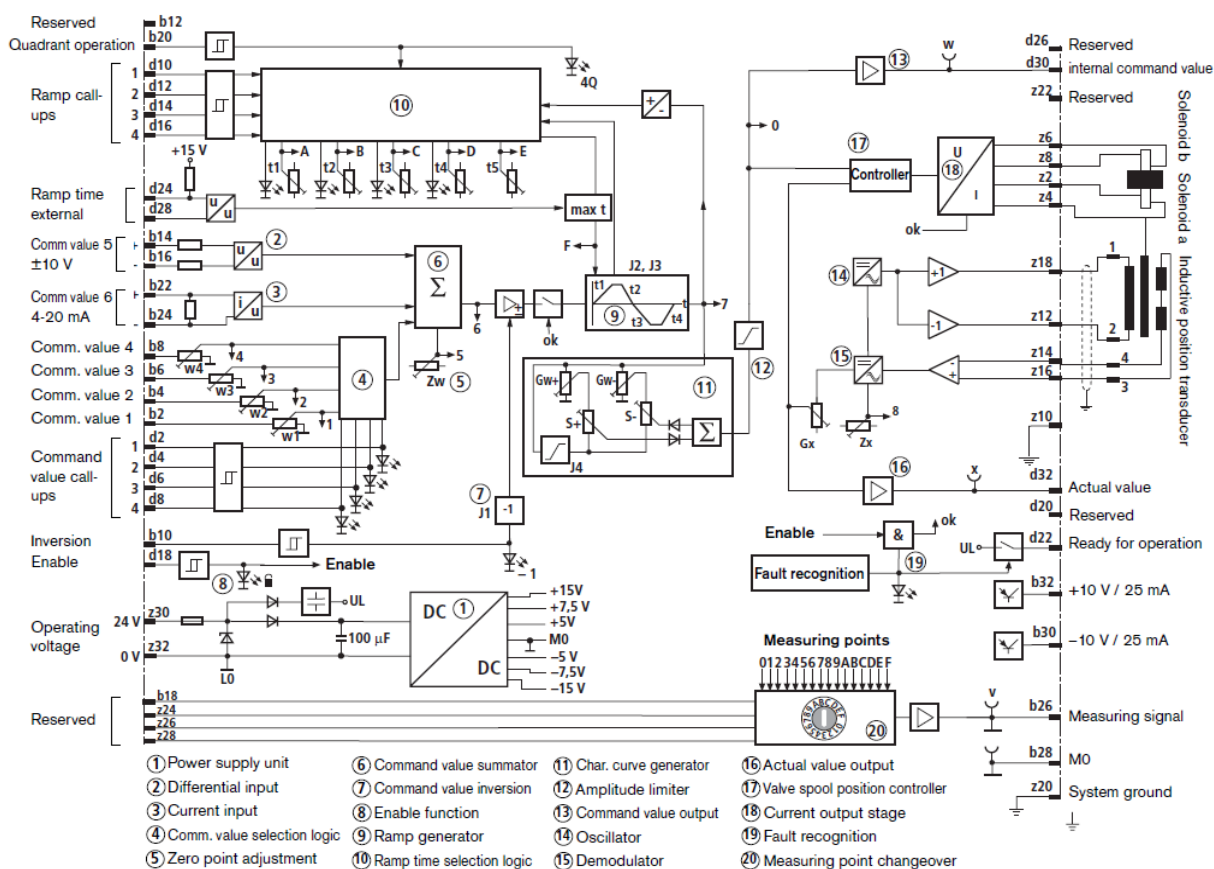
2.2.2.3 Blok proporcionálního ventilu YV3

Z mechanického hlediska se jedná o stejný typ ventilu jako je ventil YV2 uvedený v předchozí podkapitole.

Popis zařízení

Označení YV2 nese ventil 4WREE 6 E16-2X od firmy Bosch-Rexroth. Jedná se o čtyřcestný, třípolohový proporcionální ventil, jež má v sobě integrovanou řídicí elektroniku. Ventil je vybaven elektrickou zpětnou vazbou od polohy šoupátka. Schéma bloku proporcionálního ventilu je znázorněno na obr. 14. [13]

YV3 je proporcionální ventil 4WRE 6 E16-2X od firmy Bosch-Rexroth. Zásadní rozdíl oproti ventilu YV2, je v tom, že tento ventil nemá integrovanou řídicí elektroniku. Pro řízení je použita řídicí karta firmy Rexroth VT-VRPA2-1-11/V0/T5. Tato karta nabízí více možností řízení, než integrovaná elektronika ventilu YV2. Blokové schéma řídicí karty je znázorněno na obr. 17.



Obr. 17: Blokové schéma řídicí karty Rexroth VT-VRPA2-1-11/V0/T5[15]

Základní činnost regulace polohy šoupátka ventilu zůstává stejný jako u ventilu s integrovanou řídicí elektronikou. Například má řídicí karta navíc čtyři možnosti nastavení rampy.



Obr. 18: Řídicí karta Rexroth VT-VRPA2-1-11/V0/T5.[14]

Řídicí signál pro nastavení žádané polohy šoupátka ventilu je v rozsahu -10 až +10 V. Při úrovni řídicího signálu 0V je šoupátko ventilu ve středové poloze a ventilem neproudí žádná hydraulická kapalina. Při řídicím signálu +10 V proudí hydraulická kapalina maximálním průtokem ve směru z vedení P do A, a z B do T. Při signálu -10 V proudí hydraulická kapalina maximálním průtokem ve směru z vedení P do B, a z A do T. Řídicí signál pro nastavení žádané polohy šoupátka je připojen ke kartě analogových napěťových výstupů. [13]

Aktuální poloha šoupátka ventilu je rovněž v rozsahu -10 až +10 V. Signál je přiveden na kartu analogových napěťových vstupů [13].

Tab. 14: Tabulka signálů ventilu YV3.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
YV3 – Žádaná pozice	+10 V až -10 V	PQW104	word	Žádaná pozice šoupátka ventilu
YV3 – Aktuální pozice	+10 V až -10 V	PIW118	word	Aktuální pozice šoupátka ventilu

Stejně jako u proporcionálního ventilu YV2 jsou ve vedeních A a B za proporcionálním ventilem umístěny dva snímače tlaku stejného typu.

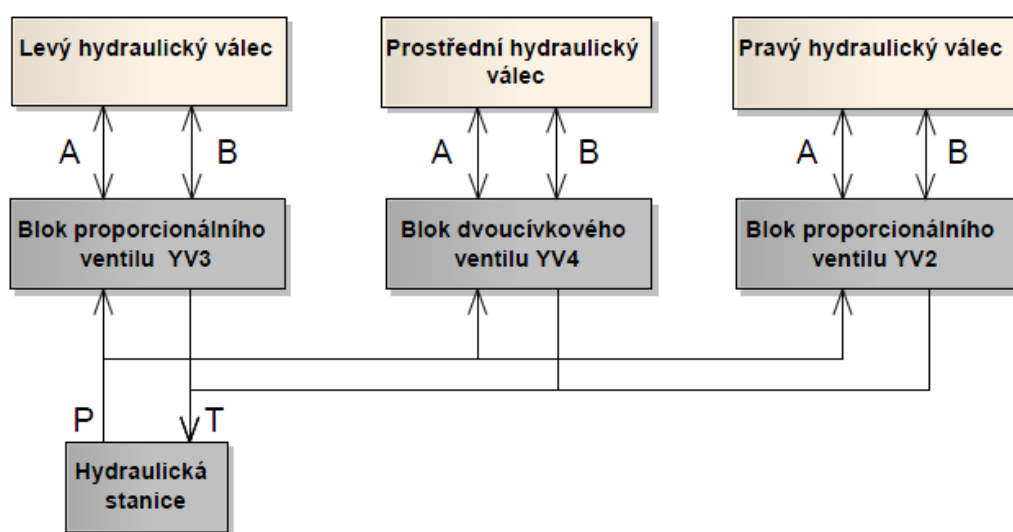
Tab. 15: Tabulka signálů snímačů tlaku bloku proporcionálního ventilu YV3.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Tlakový snímač BP3	4 – 20 mA	PIW104	word	Tlak ve vedení A
Tlakový snímač BP4	4 – 20 mA	PIW106	word	Tlak ve vedení B

Činnost řídicího programu ventilu YV3 je shodná s činností programu pro řízení ventilu YV2.

2.2.3 Soustava hydraulických válců

Velkou výhodou hydraulických systémů je snadná realizace přímočarých pohybů. Zařízení, jež převádí hydraulickou energii na mechanický přímočarý pohyb, se nazývá hydraulický válec. Existuje několik typů hydraulických válců. V soustavě jsou tři hydraulické válce. Jsou rozděleny dle fyzického uspořádání na stroji na levý, prostřední a pravý hydraulický válec. Každý hydraulický válec je řízen samostatným ventilem. Uspořádání soustavy hydraulických válců a ventilů, kterými jsou řízeny, je znázorněno na obr. 19.



Obr. 19: Blokové schéma hydraulických válců v závislosti na jiných částech hydraulické soustavy.

2.2.3.1 Snímání polohy pístu hydraulického válce

Pro regulaci polohy pístu hydraulického válce je nutné mít informaci a jeho aktuální pozici. Z tohoto důvodu je na hydraulickém válci umístěn snímač vzdálenosti.

Popis zařízení

Na reálné soustavě jsou umístěny dva snímače vzdálenosti. Jsou umístěny na levém a pravém válci. Tyto válce jsou řízeny proporcionálními ventily. Snímače jsou vyrobeny firmou Balluff a nesou označení BTL5-E10-M0250. Tyto snímače měří vzdálenosti v rozsahu 0 – 250 mm. Snímače mají proudový analogový výstup v rozsahu 4-20 mA. Délka pístnice u použitých hydraulických válců je 150 mm. Nebude tedy využit celý rozsah měření.

Tab. 16: Tabulka signálů snímačů polohy pístu.

Popis	Rozsah	Adresa	Datový typ	Komentář
Snímač pozice - levý	4 – 20 mA	PIW122	word	Levý hydraulický válec
Snímač pozice - pravý	4 – 20 mA	PIW120	word	Pravý hydraulický válec

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Pro zpracování analogového signálu je použit funkční blok. Funkční blok zpracovává hodnotu na analogovém vstupu, jež je v rozsahu 0-27648. Tuto hodnotu přepočítá na fyzikální veličinu (mm), na procenta a na úroveň elektrického signálu (mA).

Blok vyhodnocuje čtyři obsluhou definované limitní úrovně. Jedná se o spodní alarmovou hodnotu, spodní varovnou hodnotu, horní varovnou hodnotu a horní alarmovou hodnotu.

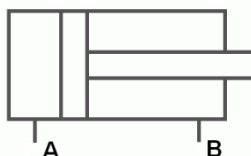
Blok dále vyhodnocuje přerušené vedení a případně vyhlásí poruchu. Při neočekávané situaci může navíc obsluha nasimulovat měřenou hodnotu a tím na určitou dobu zachovat případnou činnost zařízení, jež měřenou hodnotu zpracovávají.

2.2.3.2 Levý, prostřední a pravý hydraulický válec

Všechny tři hydraulické válce použité v reálné soustavě jsou totožné, proto budou popsány v jedné podkapitole.

Popis zařízení

Soustava obsahuje tři hydraulické válce stejného typu. Jedná se o dvojčinné válce s jednostrannou pístnicí. Jedná se o typ UHN315-FU-40/28-150-GR-G2, výrobce Ulbrich. Levý i pravý válec je řízen proporcionálním ventilem a obsahuje snímač pro měření polohy pístu. Prostřední válec je řízen dvoucívkovým ventilem a snímač polohy pístu neobsahuje.



Obr. 20: Schematická značka dvojčinného válce s jednostrannou pístnicí.

Parametry hydraulické válce:

- průměr pístu: 40 mm,
- průměr pístnice: 28 mm,
- délka pístnice: 150 mm,
- upevnění válce: patky,
- těsnění: kluznými kroužky,
- upevnění pístnice: výkyvné oko.

Požadavky na funkčnost řídicího programu

Proporcionální ventily popsané v předchozí podkapitole řídí průtok a směr proudu hydraulické kapaliny přiváděné do jednotlivých hydraulických válců, čímž dochází k pohybu pístu (pístnice) hydraulického válce. Poloha pístu je měřena snímačem vzdálenosti. Aktuální poloha pístu vstupuje do regulátoru, kde se odečte od žádané polohy pístu a tím se získá regulační odchylka. Na základě velikosti regulační odchylky regulátor vypočte akční zásah, který působí na cívky ventilu, čímž dochází ke změnám směru a průtoku hydraulické kapaliny, což má za následek řízení pístu do žádané pozice.

3. Model soustavy

Vhodným způsobem pro zkoumání vlastností regulovaného obvodu je vytvoření jeho modelu. Model regulovaného obvodu by měl co nejvíce odpovídat reálnému regulovanému obvodu.

Velký přínos modelu soustavy spočívá v možnosti predikovat chování reálného regulačního obvodu ještě dříve, než dojde k jeho realizaci [22]. Tím můžeme zjistit, zdali navrhovaný regulační obvod bude vyhovovat požadavkům, jež jsou na daný regulační obvod kladeny a případně pozměnit některé prvky obvodu, aby obvod požadavkům vyhovoval. Výhoda sestavení modelu soustavy ještě před samotnou realizací je tedy zřejmá.

Modely jsou rovněž využívány při syntéze regulátoru, jež budou reálnou soustavu řídit. Prostřednictvím některé z metod pro syntézu regulátoru se navrhne regulátor, jež splňuje naše požadavky na kvalitu regulace konkrétní soustavy.

Některé prvky hydraulického obvodu nebudou modelovány, jelikož výrobci těchto prvků neuvádějí všechna potřebná data pro sestavení kvalitního modelu ani z důvodů absence potřebných snímačů nemohou být tato data experimentálně změřena. Tyto prvky však nemají příliš velký vliv na činnost hydraulického systému, nicméně dochází ke ztrátě kvality modelu.

SimHydraulics

SimHydraulics je rozšíření simulinku určené pro modelování hydraulických systémů. SimHydraulics obsahuje knihovny hydraulických komponent (čerpadla, ventily, pohony, potrubí, hydraulické odpory...) pro modelování a simulaci hydraulických systémů. Model vzniká propojením hydraulických komponent jako by se jednalo o sestavování reálného hydraulického systému. Tento přístup eliminuje potřebu vyvozovat složité matematické vztahy, jež systém popisují. [23] [24]

Modely vytvořené v SimHydraulics mohou být použity k vývoji řídicího systému a použity pro testování výkonu řídicího systému. Do modelu je možno přidat elektrické, mechanické a pneumatické komponenty ze skupiny SimScape a komplexní model následně testovat v jednom simulačním prostředí. [24]

3.1 Model hydraulické stanice

Na obr. 4 je uvedeno blokové schéma hydraulické stanice. Blok ohřevu ani chladicí okruh nebudou modelovány. Změnu teploty v čase nabudeme v modelu uvažovat, a proto blok ohřevu a chladicí okruh nebudeme modelovat.

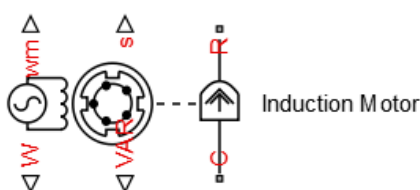
Vzhledem k tomu, že máme k dispozici pouze binární hodnotu o tom, zda je filtr znečištěn nebo nikoliv, nebudeme modelovat ani filtr. V čase, kdy byla hydraulická stanice modelována, snímač indikoval údaj, že filtr znečištěn není. Proto nebudeme v modelu uvažovat žádnou tlakovou ztrátu filtru.

Ventil YV1 nebudeme rovněž modelovat, jelikož při normálním chodu soustavy je ventil uzavřen. Chod soustavy při otevřeném ventilu YV1 není pro účely této práce podstatný.

Model hydraulické stanice by měl obsahovat model indukčního motoru, spojky, čerpadla a hydraulického vedení. Bohužel výrobce spojky ve svém katalogovém listu neuvádí informace potřebné pro sestavení modelu spojky, a proto bude model spojky z modelu hydraulické stanice vynechán.

3.1.1 Model indukčního motoru

Elektromotor v systému slouží k pohonu hydraulického čerpadla. Jedná se o indukční, třífázový a asynchronní elektromotor 100LA-4/HE od výrobce AC-Motoren. Tento motor je v tomto případě zapojen do hvězdy. Knihovny SimHydraulics již obsahují model indukčního motoru, do kterého je již pouze nutné zadat parametry konkrétního motoru z katalogového listu výrobce. Model indukčního motoru je znázorněn na obr. 21.



Obr. 21: Model indukčního motoru v Simulinku.

Výstup W označuje činný výkon elektromotoru, VAR jalový výkon elektromotoru, wm mechanickou rychlost a s označuje skluz. Porty C a R jsou mechanické porty a je na nich tvořen točivý moment ve směru od C do R .

Model indukčního motoru je v Simulinku rozdělen do tří záložek. V první záložce se definují elektrické parametry motoru (obr. 22), ve druhé parametry napájení (obr. 23) a ve třetí mechanické parametry motoru (obr. 24).

Settings

Electrical Torque | Power Supply | Mechanical

Model parameterization: By motor ratings

Rated mechanical power: 2200 W

Rated speed: 1440 rpm

Rated RMS line-to-line voltage: 400 V

Rated supply frequency: 50 Hz

Rated RMS line current: 4.65 A

R1 parameterization: From motor efficiency

Motor efficiency (percent): 84.3

Number of pole pairs: 2

Number of phases: 3

Stator connections: Star configuration

Obr. 22: Elektrické parametry modelu indukčního motoru.

Settings

Electrical Torque | Power Supply | Mechanical

Supply RMS line-to-line voltage: 400 V

Supply frequency: 50 Hz

Obr. 23: Parametry napájení indukčního motoru.

Settings

Electrical Torque | Power Supply | Mechanical

Rotor inertia: 0.0056 kg*m²

Rotor damping: 1e-4 N*m/(rad/s)

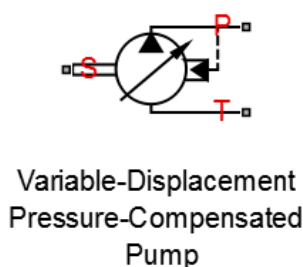
Initial rotor speed: 0 rpm

Obr. 24: Mechanické parametry indukčního motoru.

Parametr tlumení motoru (motor dumping) bohužel výrobce elektromotoru ve svém katalogovém listu neuvádí. Proto bude parametr nastaven na defaultní hodnotu.

3.1.2 Model čerpadla

V systému je umístěno axiální pístové čerpadlo s proměnlivým geometrickým objemem LRR025 od firmy Danfoss. Toto čerpadlo disponuje objemovým průtokem $Q_V = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$, $p_{\max} = 26 \text{ MPa}$. Čerpadlo je vybaveno ventilem pro kompenzaci tlaku, který je nastaven na výstupní tlak $p = 50 \text{ bar}$. Čerpadlo je poháněno elektromotorem, a je k němu propojeno prostřednictvím hřídele a spojky. Jak již bylo uvedeno výše, nemáme k dispozici model spojky, a proto v modelu budeme předpokládat pevné propojení pomocí hřídele.



Obr. 25: Model čerpadla s proměnlivým geometrickým objemem a s kompenzací výstupního tlaku.

Z obr. 25, kde je vidět model čerpadla je vidět, že model má tři porty. Port S je mechanický port, který slouží pro připojení hřídele, jež čerpadlo pohání. Porty P a T jsou hydraulické porty. Port T je vstupní port, nejčastěji připojen k hydraulické nádrži a port P je port výstupní, jež slouží pro připojení různých ventilů a hydromotorů. Otáčí-li se hřídel v kladném směru, tak proudí hydraulická kapalina směrem od portu T do portu P .

Na obr. 26 jsou vidět parametry modelu čerpadla. Jedná se především o maximální změnu geometrického objemu čerpadla, parametry pro nastavení tlaku, parametry účinnosti a jmenovité hodnoty uvedené na štítku čerpadla (v katalogovém listě).

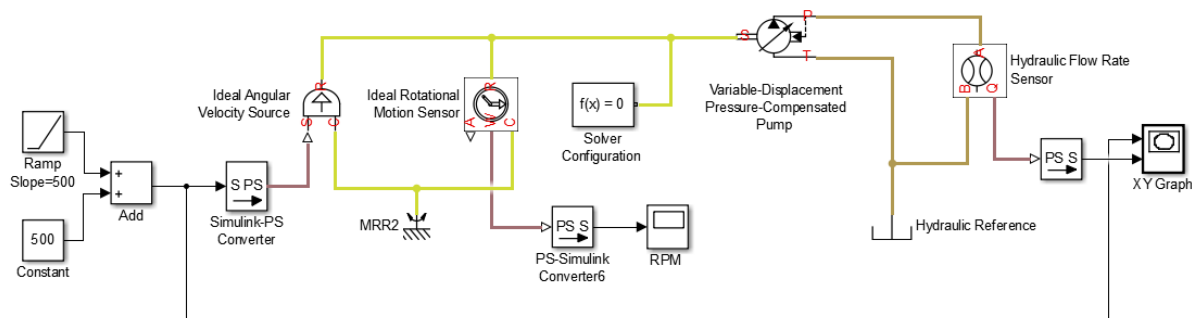
Settings

Parameters

Maximum displacement:	0.000025	m ³ /rev
Setting pressure:	50	bar
Pressure regulation range:	2.5	bar
Volumetric efficiency:	0.86	
Total efficiency:	0.78	
Nominal pressure:	260	bar
Nominal angular velocity:	3200	rpm
Nominal kinematic viscosity:	0.0000178	m ² /s
Nominal fluid density:	950	kg/m ³

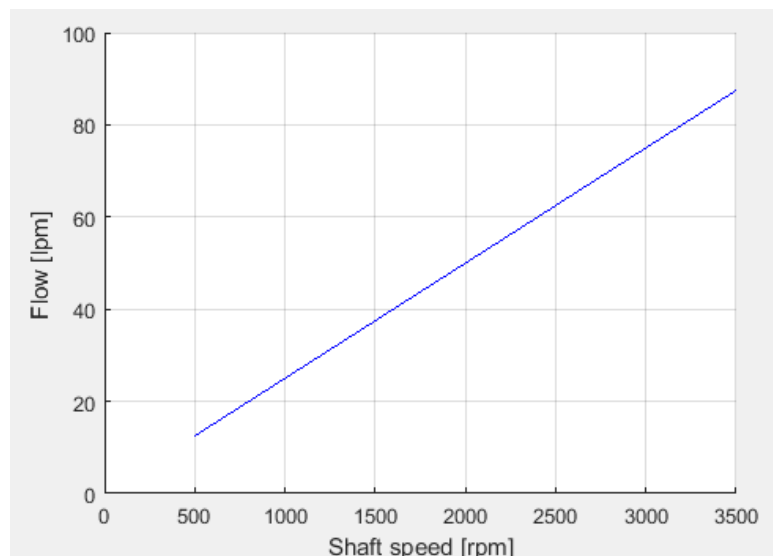
Obr. 26: Parametry modelu čerpadla.

Na obr. 27 je vidět schéma v Simulinku s modelem čerpadla, jež slouží k získání průtočné charakteristiky čerpadla – závislost průtoku čerpadla na otáčkách hřídele čerpadla.



Obr. 27: Model čerpadla ve schématu pro sestavení průtočné charakteristiky čerpadla.

Na obr. 28 je vidět tato průtočná charakteristika čerpadla. Tato charakteristika je srovnatelná s tou, jež ve svém katalogovém listu [26] uvádí výrobce čerpadla.



Obr. 28: Průtočná charakteristika modelu čerpadla.

V případě, že mezi porty P a T se umístí například nekonečný hydraulický odpor, čerpadlo (tlakový kompenzační ventil) zajistí, že výstupní tlak čerpadla nepřekročí hodnotu nastavenou na ventilu (okolo 50 bar).

3.1.3 Doplnění modelu hydraulické stanice

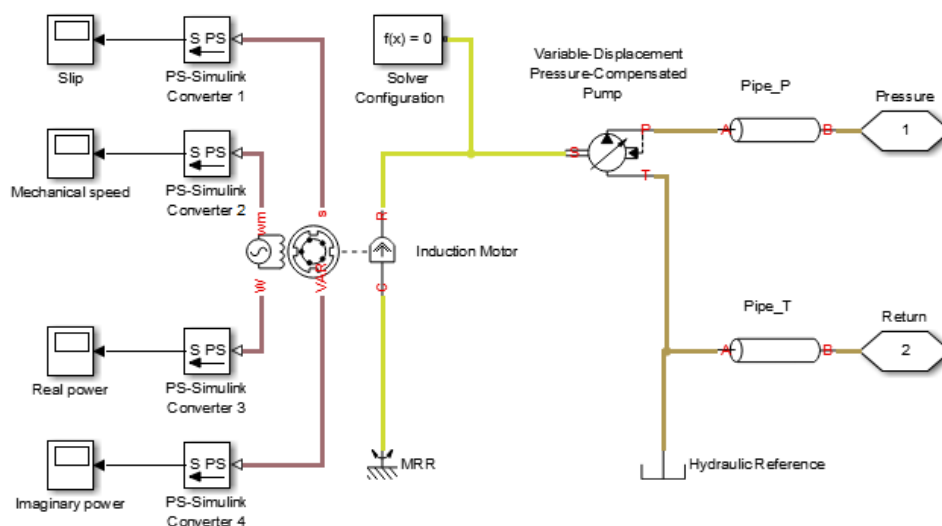
K dokončení hydraulické stanice chybí doplnit do obvodu hydraulická vedení. V katalogovém listu výrobce opět nejsou uvedeny všechny informace, jež jsou pro vytvoření modelu hydraulického vedení v SimHydraulics nezbytné. Výrobce ve svém katalogovém listu uvádí pouze vnitřní průměr hydraulické hadice v rozsahu od 12,8 do 13,4 mm. Jako parametr průměru hadice zvolíme střed těchto dvou hraničních hodnot, tedy 13,1 mm. Dále se měřením zjistilo, že hydraulická hadice má délku 0,8 m. Parametrizace hydraulického vedení je znázorněna na obr. 29. Model hydraulické stanice je znázorněn na obr. 30.

Settings

Parameters

Pipe cross section type:	Circular
Pipe internal diameter:	0.0131 m
Geometrical shape factor:	64
Pipe length:	0.8 m
Aggregate equivalent length of local resistances:	0.2 m
Internal surface roughness height:	1.5e-5 m
Laminar flow upper margin:	2e+3
Turbulent flow lower margin:	4e+3
Pipe wall type:	Rigid
Specific heat ratio:	1.4
Initial pressure:	0.1 bar

Obr. 29: Parametry hydraulických vedení, jež spojují hydraulickou stanici s řídicími hydraulickými prvky.



Obr. 30: Model hydraulické stanice.

3.2 Model řídicích hydraulických prvků

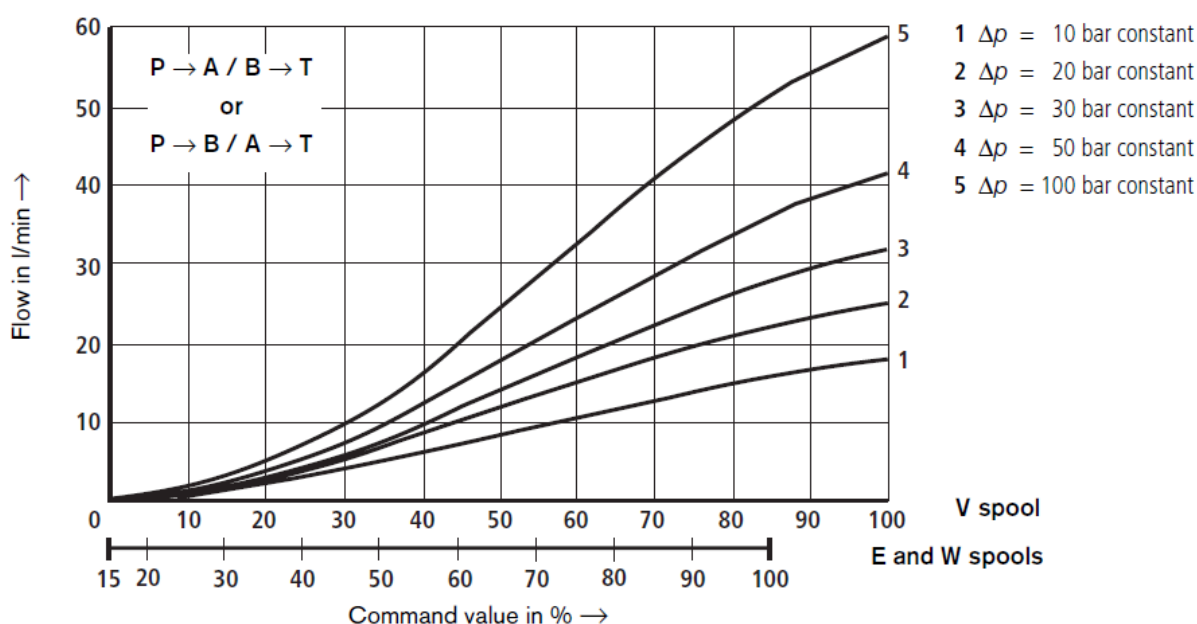
Tato podkapitola popisuje tvorbu modelu proporcionálních ventilů. Dvoucívkový ventil YV4 nebude modelován.

3.2.1 Model proporcionálního ventilu

V soustavě se vyskytují dva proporcionální ventily. Z mechanického hlediska jsou tyto ventily totožné. Rozdílný je způsob řízení jednotlivých ventilů. Šoupátko ventilu YV3 je řízeno regulační kartou Rexroth a šoupátko ventilu YV2 řídí integrovaná elektronika ventilu. Porovnání těchto dvou typů řízení je jeden z předmětů, jež popisuje kapitola 9.

3.2.1.1 Statické vlastnosti proporcionálního ventilu

Statické vlastnosti popisují chování ventilu v ustáleném stavu (po odeznění přechodového děje). Jednou z nejdůležitějších statických vlastností proporcionálních ventilů je průtočná charakteristika ventilu. Ta udává průtok v závislosti na otevření ventilu a na diferenčním tlaku. Průtočná charakteristika proporcionálních ventilů, jež jsou použity v reálné soustavě je vidět na obr. 31.



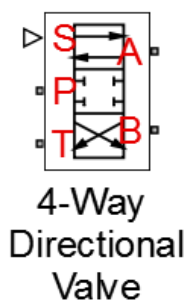
Obr. 31: Průtočná charakteristika proporcionálního ventilu.

Dle této průtočné charakteristiky byly namodelovány statické vlastnosti proporcionálního ventilu. Bylo tedy nutné z grafu průtočné charakteristiky odečíst jednotlivé průtoky při určitém otevření ventilu a při určitém diferenčním tlaku. V tab. 17 jsou vidět odečtené hodnoty pouze pro kladnou úroveň řídicího signálu, jelikož se jedná o lichou funkci a odečet hodnot pro zápornou úroveň řídicího signálu je tedy zbytečný. Výsledné průtoky jsou uvedeny v litrech za minutu.

Tab. 17: Jednotlivé průtoky odečtené z průtočné charakteristiky uvedené v katalogovém listu výrobce. Průtoky jsou uvedeny v litrech za minutu.

Cmd - Δp	10bar	20bar	30bar	50bar	100bar
0%	0	0	0	0	0
10%	0	0	0	0	0
20%	0,2	0,4	0,6	0,8	1
30%	1,6	1,8	2	2,5	3,2
40%	3	3,8	4,5	5,5	7
50%	5	7,5	8	9	12,5
60%	7	10	11,5	15	20
70%	9	13,5	16	20,5	28
80%	12	17,5	20,5	25,5	36
90%	14	20	24	31	44,5
100%	16	22	28	36	52

Na obr. 32 je vidět komponenta třípolohového, čtyřcestného ventilu. Vstup *S* je příkaz pro vychýlení šoupátka, *P* je přívodní tlakové vedení (z hydrogenerátoru), *T* je zpětné vedení do nádrže s hydraulickým olejem a *A, B* jsou výstupní vedení určená pro připojení k hydropohonům.



Obr. 32: Komponenta 4/3 ventilu v SimHydraulics.

Pro parametrizaci daného ventilu existují v SimHydraulics tři metody: parametrizace definováním maximální plochy a otevření, definováním jednotlivých ploch v závislosti na otevření a definice pomocí tlakově–průtokové charakteristiky. Pro účely vytvoření modelu ventilu byla zvolena třetí možnost a do modelu ventilu byly dosazeny parametry z tab. 17. Byla zvolena kubická interpolační metoda a extrapolace vypočtená z posledních dvou hodnot.

Settings

Basic parameters | Initial openings

Model parameterization: By pressure-flow characteristic

Tabulated valve openings: [0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0] cm

Tabulated pressure differentials: [10 20 30 50 100] bar

Tabulated flow rates: .5 25.5 36 ; 14 20 24 31 44.5 ; 16 22 28 36 52] lpm

Interpolation method: Cubic

Extrapolation method: From last 2 points

Obr. 33: Parametrizace 4/3 ventilu v SimHydraulics.

V další záložce se definují počáteční otevření ventilu. To se odvíjí od typu ventilu. Vzhledem k použitému typu ventilu (obr. 12 a obr. 14) jsou všechny tyto čtyři parametry nastaveny do nulové hodnoty, jelikož v případě středové pozice šoupátka zůstávají všechny cesty ventilu uzavřeny. Nastavení počátečních otevření ventilu pro jednotlivé typy ventilu je uvedeno ve zdroji [25].

Settings

Basic parameters | Initial openings

Orifice P-A initial opening: 0 m

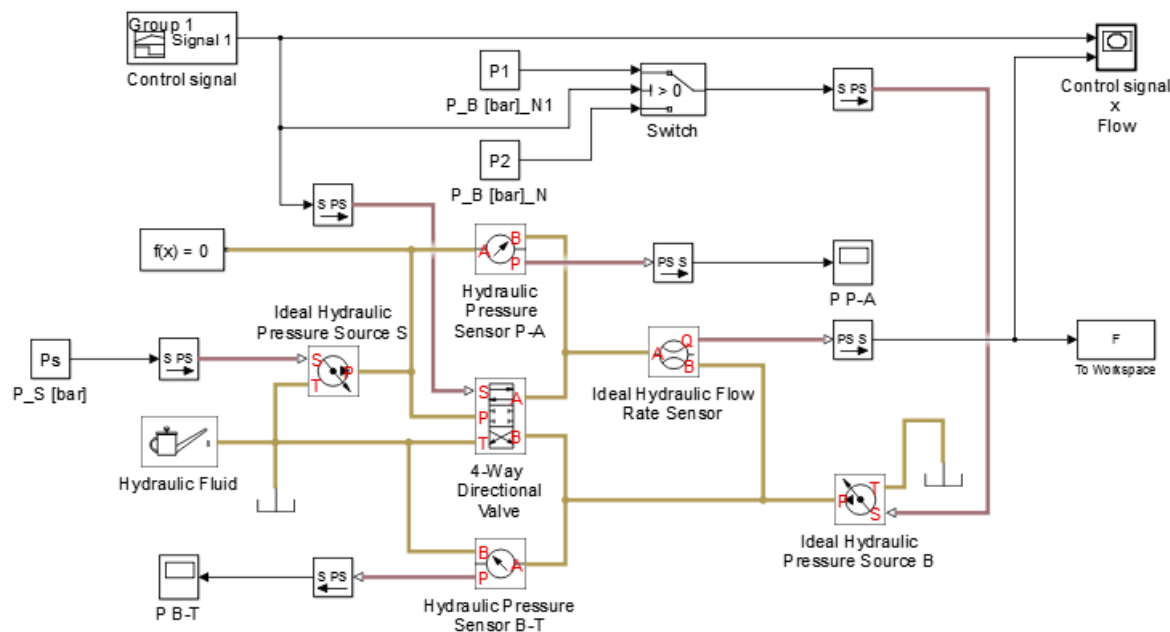
Orifice P-B initial opening: 0 m

Orifice A-T initial opening: 0 m

Orifice B-T initial opening: 0 m

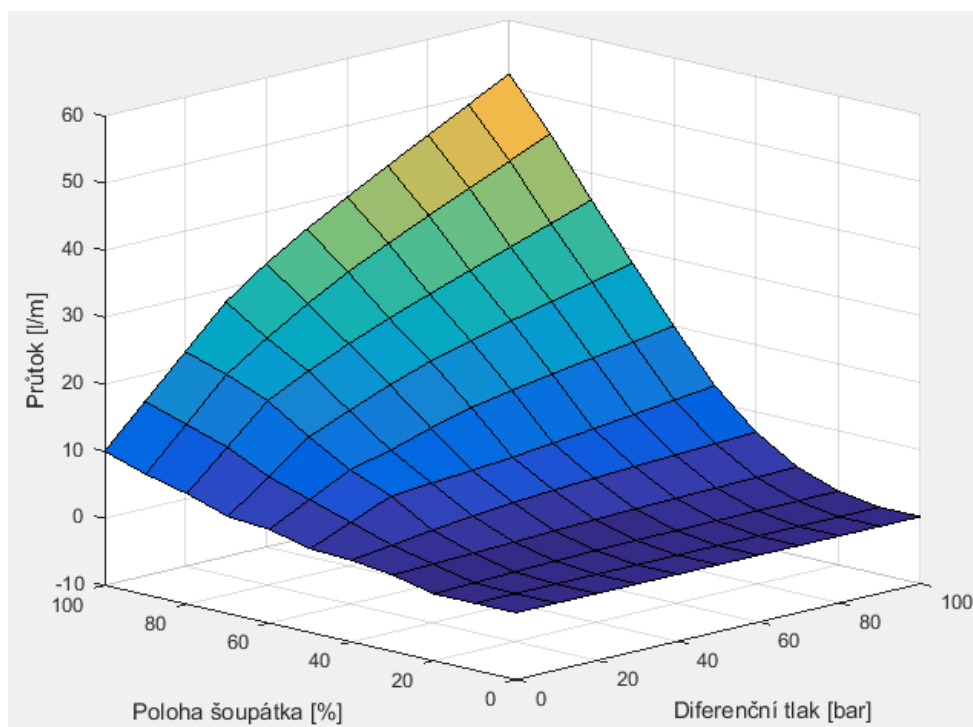
Obr. 34: Nastavení parametrů pro počáteční otevření ventilu.

Pro testování modelu ventilu bylo v Simulinku vytvořeno schéma uvedené na obr. 35. Ve schématu jsou umístěny dva ideální zdroje tlaku. Na ventilu jsou prostřednictvím snímačů tlaku měřeny tlakové difference a prostřednictvím snímače průtoku se za ventilem měří průtok, jež je zaznamenáván do grafu a zároveň do proměnné v Matlabu pro další užití.



Obr. 35: Schéma v Simulinku pro testování parametrizovaného ventilu.

Na obr. 36 je vidět průtočná charakteristika ventilu, jež byla získána pomocí zapojení uvedeného na obr. 35. V grafu je vidět závislost průtoku na otevření ventilu (poloze šoupátka) a na diferenčním tlaku. Z grafu je patrné, že charakteristika je nelineární. Charakteristika je vyobrazena pouze pro kladné výchylky šoupátka ventilu.

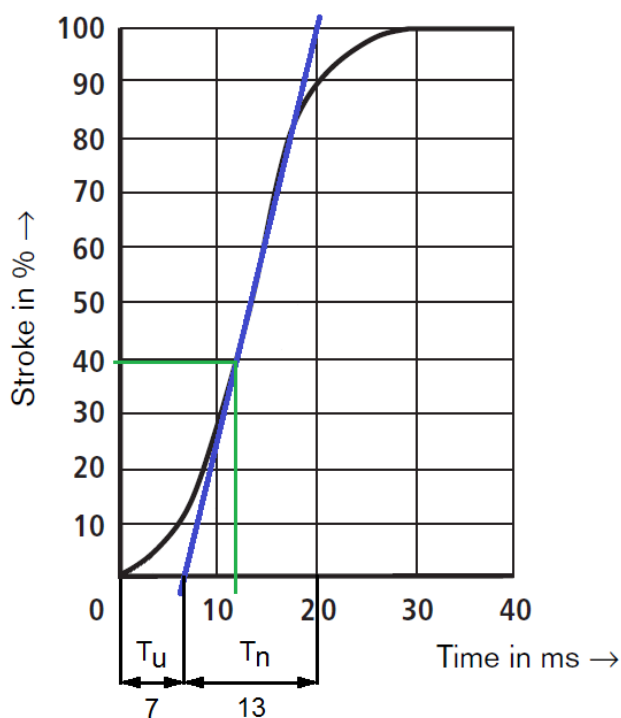


Obr. 36: Průtočná charakteristika modelu proporcionálního ventilu.

3.2.1.2 Dynamické vlastnosti proporcionálního ventilu

Dynamické vlastnosti popisují chování systému při přechodu mezi ustálenými stavy. Dynamika proporcionálního ventilu je definována konečnou rychlostí pohybu šoupátka ventilu. Jak již bylo zmíněno v této kapitole, poloha šoupátka ji řízena buď integrovanou elektronikou přímo ve ventilu, nebo elektronikou regulační karty. Regulátor polohy šoupátka je tedy realizován jedním z těchto dvou způsobů. Výrobce ventilu ve svém katalogovém listu uvádí pouze přechodovou charakteristiku uzavřeného regulačního obvodu, která představuje vnitřní regulační smyčku obr. 65. Tento regulační obvod se zápornou zpětnou vazbou bude tedy předmětem modelování.

Na obr. 37 je vidět přechodová charakteristika z katalogového listu výrobce ventilu a na ní byly vyznačeny důležité body pro identifikaci obvodu.



Obr. 37: Přechodová charakteristika regulace polohy šoupátka proporcionálního ventilu uvedená v katalogovém listu výrobce.

Pro identifikaci obvodu z přechodové charakteristiky byla použita Strejcova metoda a postup identifikace byl následující:

- Vypočte se: $\tau = \frac{T_u}{T_n} = \frac{7}{13} = 0.54$. Tento výsledek je větší než 0.1, což vede na obrazový přenos se stejnými časovými konstantami, tedy přenos ve tvaru: $G(s) = \frac{K}{(Ts+1)^n}$.
- $K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{100}{100} = 1$
- Sestrojíme tečnu v inflexním bodě (modrá přímka na obr. 37).

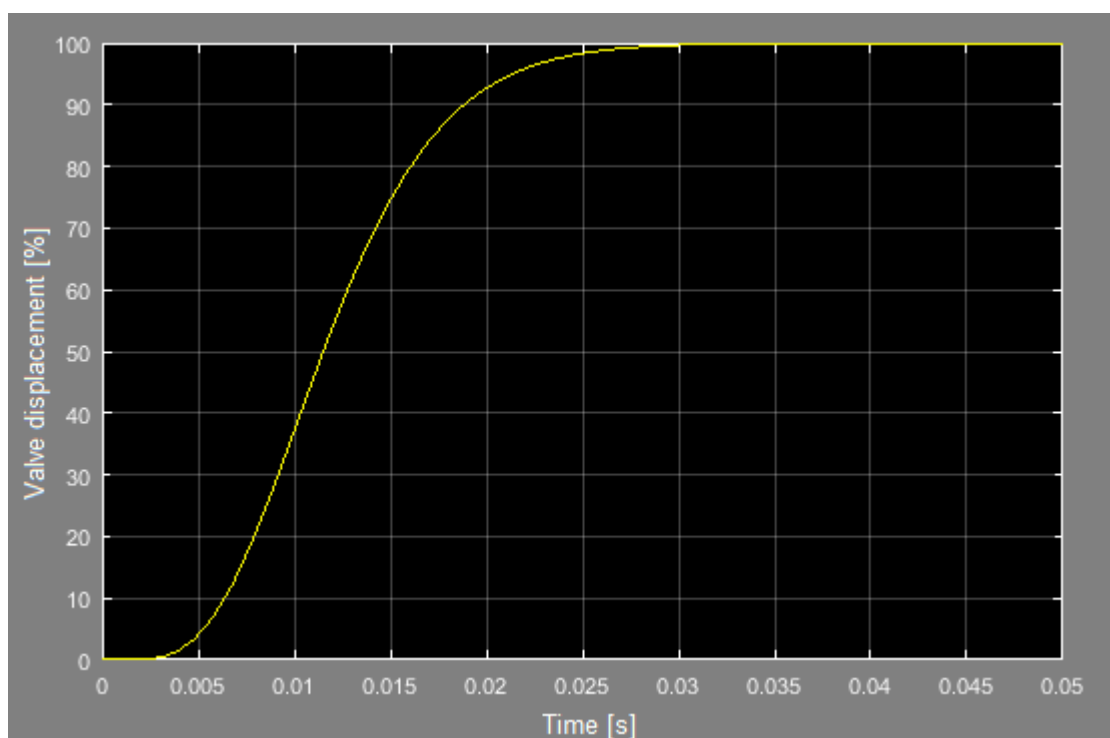
- Podle vypočítané hodnoty τ určíme z tab. 18 nejbližší vyšší řád n aproximační soustavy a souřadnici inflexního bodu y_i . Dle vypočteného τ se tedy jedná o soustavu 7. řádu.

Tab. 18: Stanovení řádu n aproximační soustavy a zpřesnění polohy inflexního bodu.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ	0,104	0,218	0,319	0,41	0,493	0,57	0,642	0,709	0,773
y_i	0,264	0,327	0,359	0,371	0,384	0,394	0,401	0,407	0,413

- Pomocí y_i určíme v grafu přechodové charakteristiky inflexní bod a odečteme souřadnici t_i (zelené přímky na obr. 37).
- Vypočte se hodnota časové konstanty: $T = \frac{T_i}{n-1} = \frac{0,0122}{7-1} = 0,00203$.
- Tím se získá výsledný přenos: $G(s) = \frac{1}{(0,00203s+1)^7}$

Na obr. 38 je pak vidět přechodová charakteristika získaného přenosu. Zjištěná přechodová charakteristika získaného přenosu je přibližně stejná jako ta, jež v katalogovém listu uvádí výrobce proporcionálního ventilu.



Obr. 38: Přechodová charakteristika přenosu získaného aproximací přechodové charakteristiky Strejcovou metodou.

Takto získaný přenos se pak jednoduše připojí na vstup S modelu proporcionálního ventilu. Tím do výsledného modelu zahrneme dynamické vlastnosti spojené s konečnou rychlostí šoupátka proporcionálního ventilu.

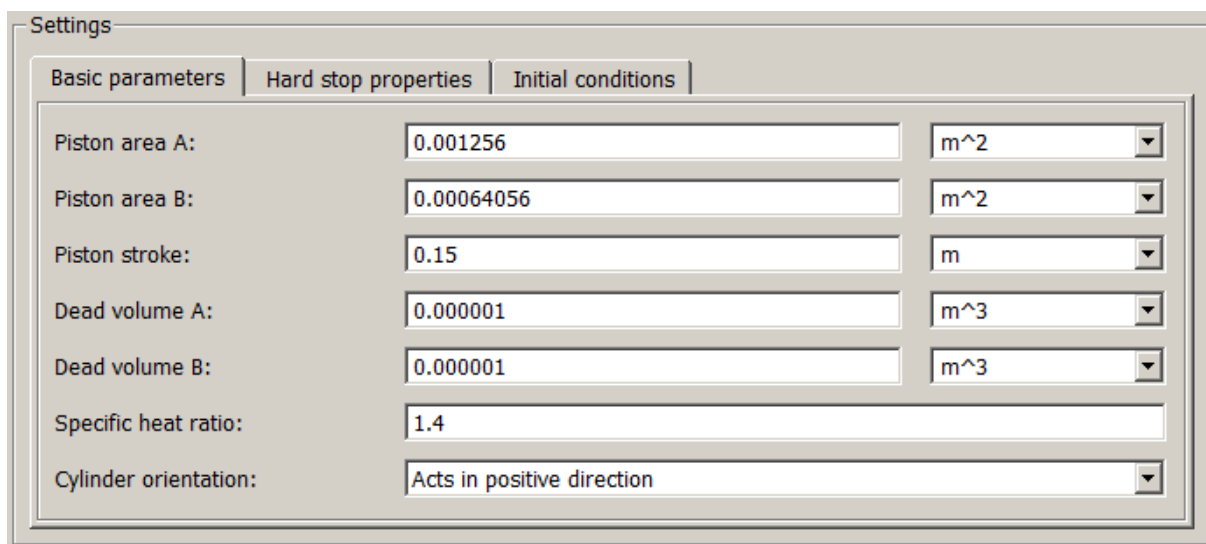
3.3 Model soustavy hydraulických válců

Model hydraulického systému nebude obsahovat model prostředního válce a ani ventilů, jež tento válec řídí. Tento válec neřídí ventil s proporcionálním řízením a válec ani nedisponuje měřením pozice pístu. Z těchto důvodů není možné pozici ventilu řídit ve zpětnovazební smyčce. Všechny válce použité v hydraulickém systému jsou totožné.

3.3.1 Model hydraulického válce

V soustavě jsou použity hydraulické válce UHN1 315-FU-40/28 od firmy Ulbrich. Tyto válce mají zdvih pístu 150 mm, průměr válce 40 mm a průměr pístnice 28 mm. Jedná se o dvojčinný hydraulický válec. Parametry modelu válce jsou znázorněny na obr. 39.

Mezi základní parametry modelu dvojčinného válce patří: plocha komory A (komora, ve které se nenachází pístnice), plocha komory B, zdvih, objemy jednotlivých komor při krajních pozicích pístu, teplotní parametr (teplotní jevy jsou v tomto modelu zanedbávány) a směr, kterým se pístnice vysouvá.



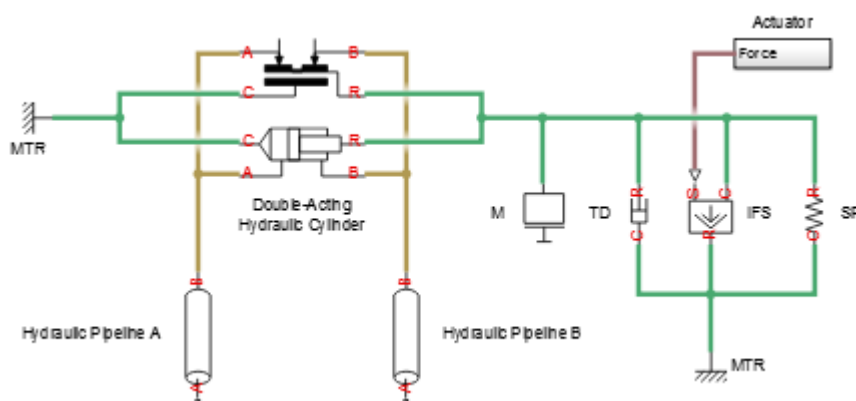
Settings		
Basic parameters Hard stop properties Initial conditions		
Piston area A:	0.001256	m ²
Piston area B:	0.00064056	m ²
Piston stroke:	0.15	m
Dead volume A:	0.000001	m ³
Dead volume B:	0.000001	m ³
Specific heat ratio:	1.4	
Cylinder orientation:	Acts in positive direction	

Obr. 39: Parametry modelu dvojčinného hydraulického válce.

Další záložka modelu obsahuje parametry, které se týkají koncových poloh hydraulického válce. Tento válec neobsahuje tlumení koncových pozic, a proto není příliš vhodné operovat s pozicí pístu v blízkosti koncových poloh. Z tohoto důvodu model nebude tyto parametry obsahovat. Poslední

záložkou modelu jsou počáteční podmínky. Prvním parametrem je počáteční poloha pístu. Další dva parametry jsou počáteční tlaky v jednotlivých komorách.

Na obr. 40 je vidět zapojení modelu dvojčinného hydraulického válce. Pístnici válce je nutné připojit k mechanickým translačním prvkům. M (hmota) představuje hmotnost pístu, pístnice a mechanického zakončení pístnice. Představuje tedy uložení kinetickou energii. SP (pružina) představuje uložení potenciální energie a TD (tlumič) představuje viskózní ztráty energie v důsledku pohybu. IFS představuje sílu, jež působí na pístnici. Válec je zavěšen tak, že se pístnice vysouvá směrem k zemi. Jedinou silou, která na válec působí, je tedy síla gravitační. [27]



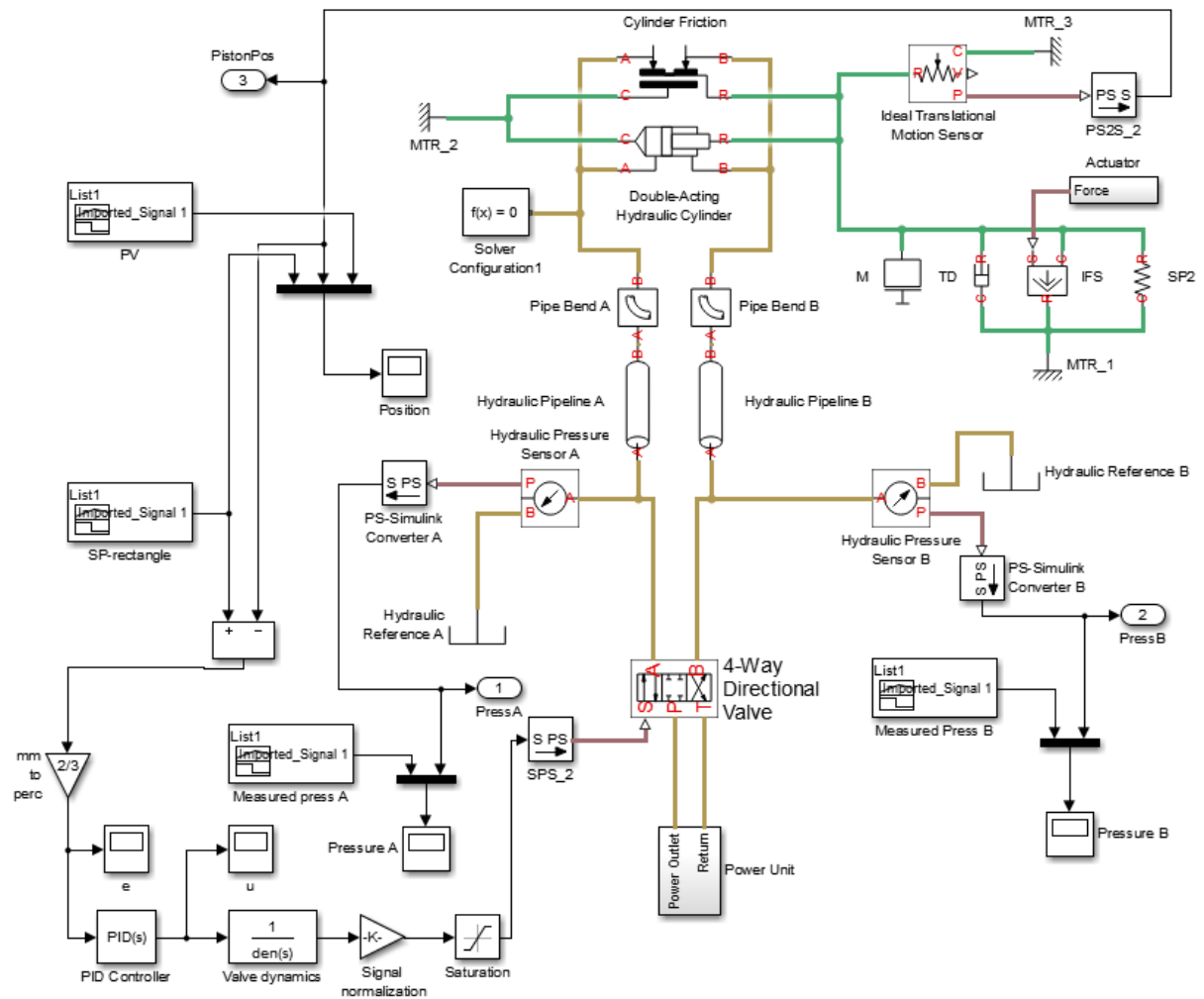
Obr. 40: Připojení modelu hydraulického válce k mechanickým prvkům představujícím zátěž válce.

Hmotnost byla dle použitého typu válce vypočtena přibližně 20kg. Gravitační síla je vypočtena dle vztahu $F_g = m \cdot g$. Ostatní parametry mechanických prvků zatím nejsou známy.

Tření je obtížně simulovatelný jev, neboť je nelineární a v mnohých případech i obtížně předvídatelný. V tomto modelu bude uvažováno pouze tření mezi stěnami válce, pístem a pístnicí. Ostatní třecí síly budou v tomto modelu zanedbány. [35]

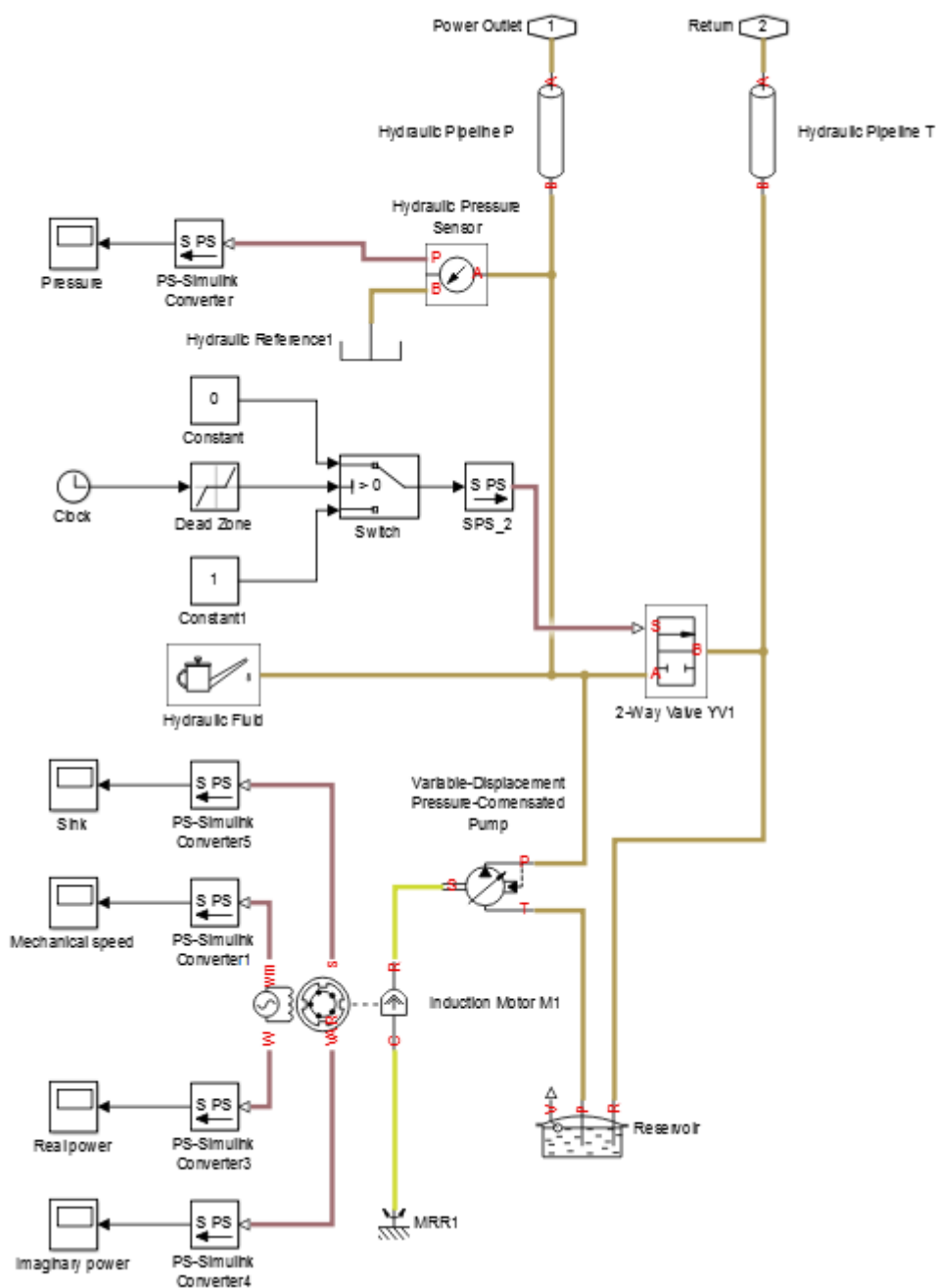
Tyto mechanické parametry by byly dle dostupných informací jen velmi obtížně vypočitatelné. V simulinku existuje nástroj, jež slouží pro odhad parametrů modelu (Parameter Estimation). Nicméně je pro sestavení modelu nutné naměřit procesní hodnoty na reálné soustavě (například pozici pístu hydraulického válce). Což znemožňuje sestavení modelu systému ještě před jeho realizací.

Pro odhad mechanických parametrů je nutné sestavit model všech podstatných částí hydraulického obvodu, jedná se tedy o model hydraulické stanice, model hydraulického ventilu a samozřejmě model hydraulického válce. Tento model je znázorněn na obr. 41. Model obsahuje všechny modely jednotlivých prvků z předchozích podkapitol. Pozice pístu je řízena P regulátorem se zesílením 10, jež zesiluje regulační odchylku (rozdíl žádané a skutečné hodnoty pozice pístu).



Obr. 41: Model hydraulického systému s jedním válcem.

Model obsahuje podsystém Power Unit, jež je zjednodušeným modelem hydraulické stanice. Tento model je znázorněn na obr. 42. Z obr. 42 je patrné, že je v modelu zahrnut i model ventilu YV1. Tento ventil se sepne až po stanoveném čase, z důvodu náběhu čerpadla na provozní tlak.



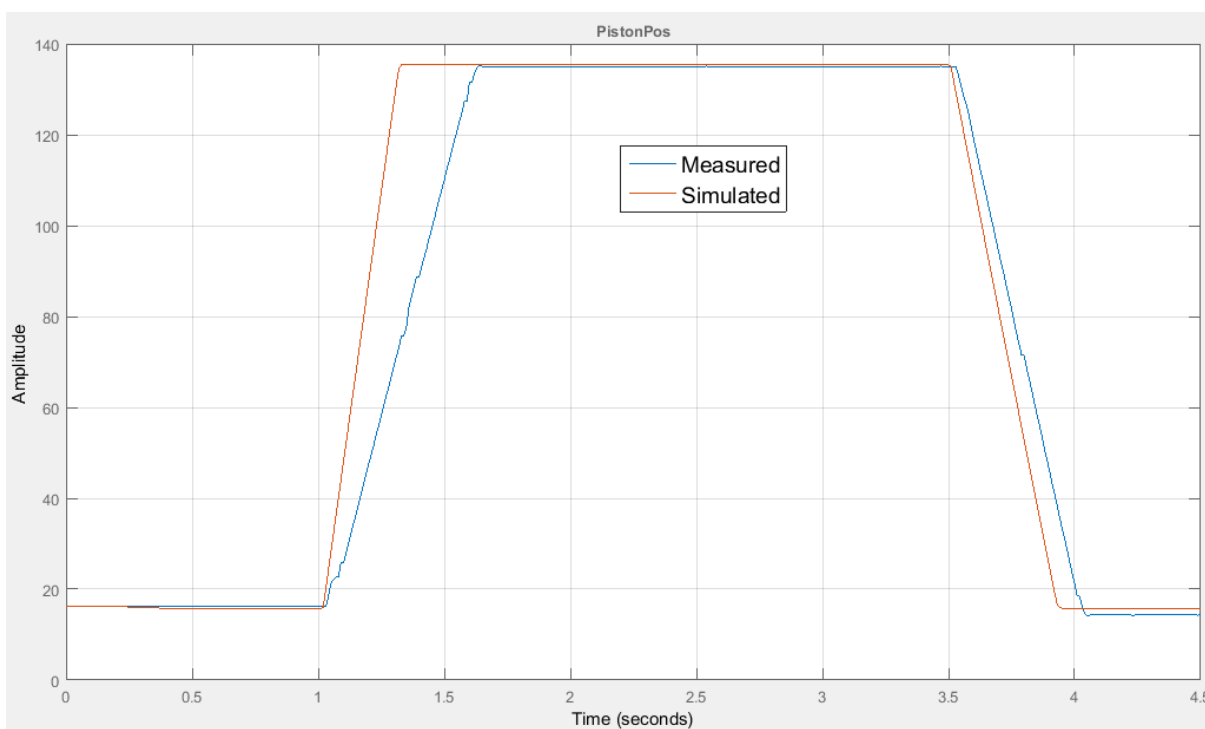
Obr. 42: Model hydraulické stanice.

Pomocí specializovaného software pro měření procesních dat z PLC, byly naměřeny procesní veličiny, které byly následně exportovány do CSV souboru a importovány do Simulinku. Například SP (žádaná pozice pístu hydraulického válce) byla importována do bloku Signal builder. Tímto se dosáhne u simulace modelu stejných podmínek jako u měření reálné soustavy. SP má trojúhelníkový tvar, periodu signálu 4 s, amplitudu 60 mm a offset 75 mm.

Místo hodnot neznámých parametrů se dosadí přibližné, předpokládané hodnoty. Poté se spustí nástroj Parameter Estimation, kde se navolí parametry, které je potřeba odhadnout. Dále se importuje průběh měřené veličiny, jež byla změřena na reálném systému (v tomto případě aktuální pozice pístu). Dále je nutné zvolit typ ztrátové funkce. Byl zvolen typ Sum squared error, tedy součet kvadrátů odchylky mezi naměřeným a simulovaným průběhem. Jako optimalizační metoda byla zvolena Pattern search. Úkolem nástroje Parameter Estimation je tedy minimalizace této ztrátové funkce, aby došlo k co nejpřesnější shodě mezi měřeným a simulovaným průběhem. Na obr. 43 je vidět průběh měřené a simulované veličiny před odhadem parametrů, tedy s experimentálně nastavenými parametry.

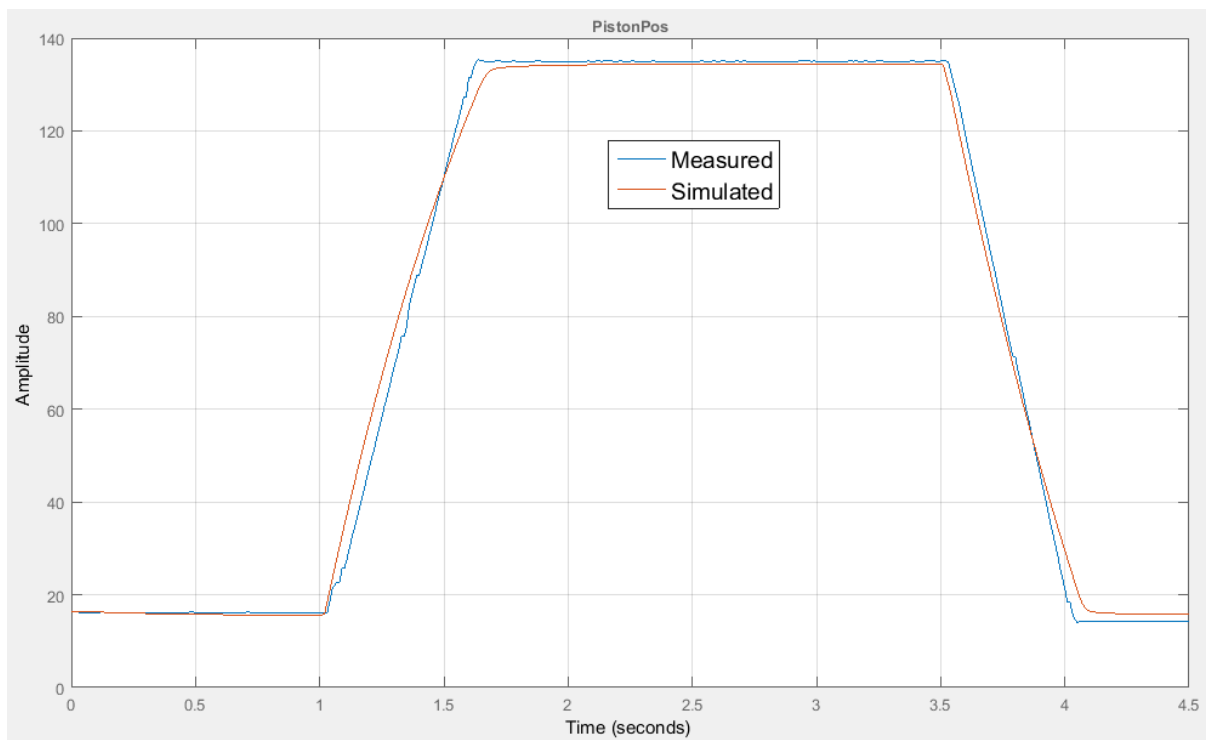
Průběhy jsou odezvou na obdélníkový impuls definovaný rovnicí:

$$w(t) = \begin{cases} 15, & \text{pro } t \in < 1; 3,5 > [s]; \\ 135, & \text{pro } t \in < 0; 1 > \cup (3,5; 4,5 > [s]. \end{cases} \quad (1)$$



Obr. 43: Porovnání naměřeného průběhu aktuální pozice pístu s průběhem simulovaným před odhadem parametrů.

Poté se spustí odhad a nástroj Parameter estimation hledá minimum ztrátové funkce. Výsledek je znázorněn na obr. 44.

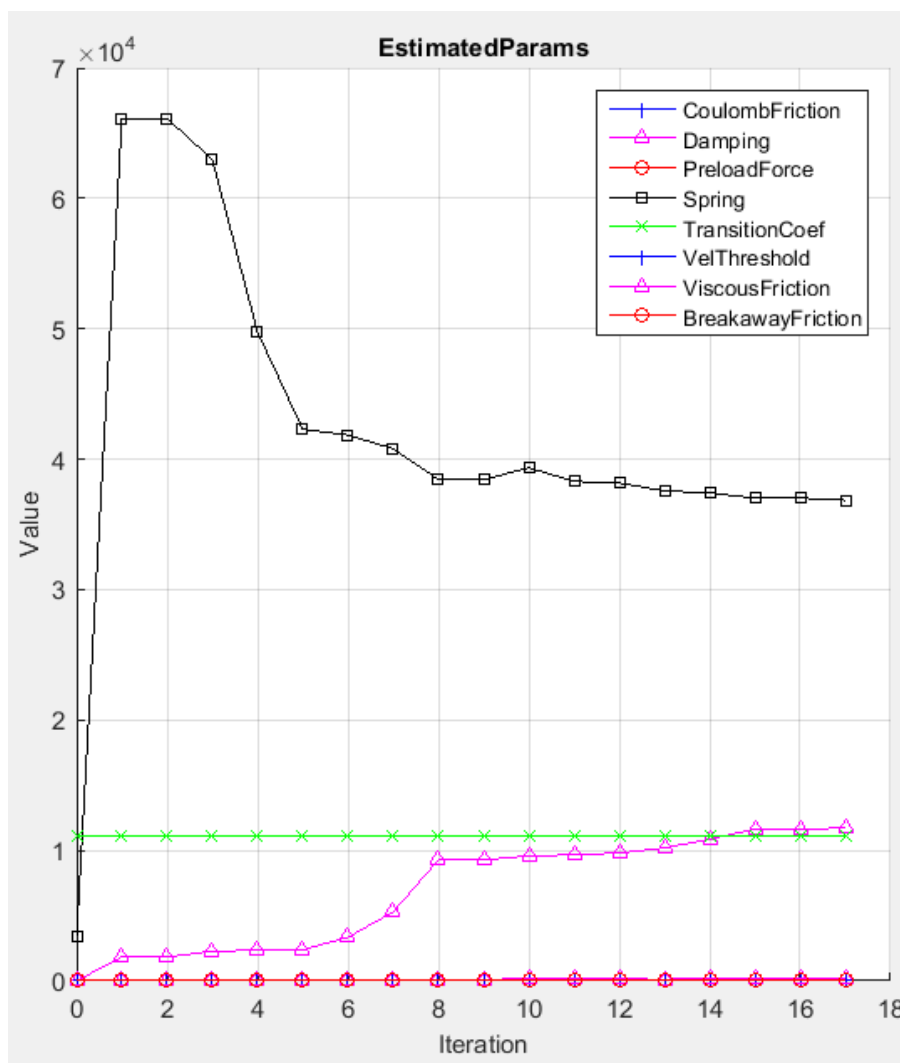


Obr. 44: Porovnání naměřeného průběhu aktuální pozice pístu s průběhem simulovaným po odhadu parametrů.

V tab. 19 je přehled odhadovaných veličin a jejich hodnoty před a po odhadu. Na obr. 45 je vidět jak nástroj Parameter estimation měnil hodnoty jednotlivých parametrů v každé iteraci své činnosti.

Tab. 19: Přehled odhadovaných parametrů a jejich hodnoty před a po odhadu.

Název parametru	Jednotka	Hodnota před odhadem	Hodnota po odhadu
Damping coefficient	N/(m/s)	200	11717
Spring rate	N/m	5000	36854
Preload force	N	10	24,87
Coulomb friction force coefficient	N/Pa	0,0001	0,00091
Breakaway friction increase coefficient	-	10	10,892
Viscous friction coefficient	N/(m/s)	20	153,37
Transition approximation coefficient:	s/m	1000	11146
Linear region velocity threshold:	m/s	0,005	1,02



Obr. 45: Průběh změny odhadovaných parametrů v závislosti na aktuální iteraci nástroje *Parameter estimation*.

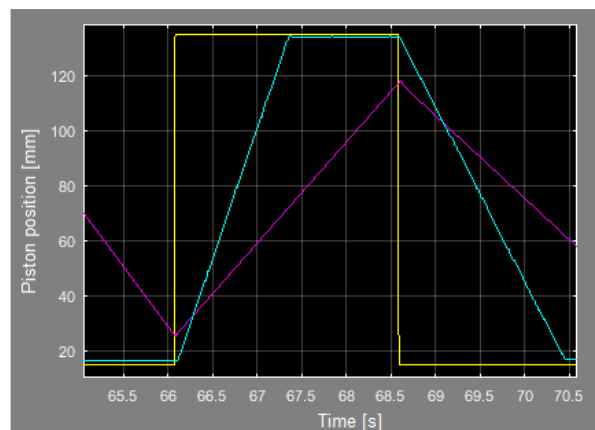
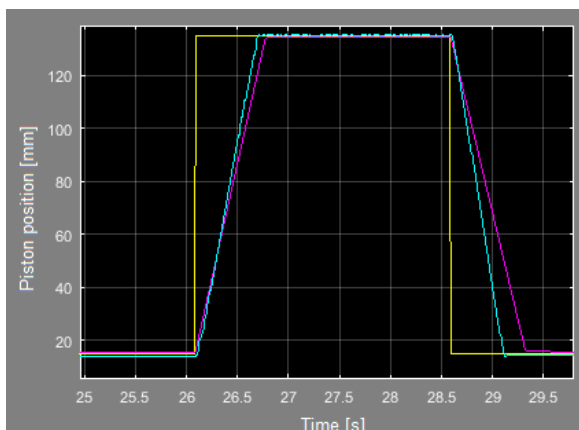
V tab. 20 je vidět, jak se hodnota ztrátové funkce měnila v závislosti na číslu iterace. Celý proces odhadu parametrů trval na PC s procesorem i7 zhruba 30 minut. Délka procesů je závislá na výkonu výpočetní techniky, na přesnosti nastavení počátečních parametrů, na složitosti modelu, délce simulovaného průběhu a samozřejmě na počtu odhadovaných parametrů.

Tab. 20: Průběh hodnoty ztrátové funkce v závislosti na číslu iterace.

Iteration	F-count	Exp_1 (Minimize)
0	17	4.9493
1	34	1.9006
2	51	1.9006
3	68	1.4377
4	85	0.5007
5	102	0.3746
6	119	0.3576
7	136	0.3272
8	153	0.2744
9	170	0.2744
10	187	0.2723
11	204	0.2695
12	221	0.2682
13	238	0.2636
14	255	0.2596
15	272	0.2465
16	289	0.2465
17	306	0.2456

3.3.2 Aktualizace modelu řídicích hydraulických prvků

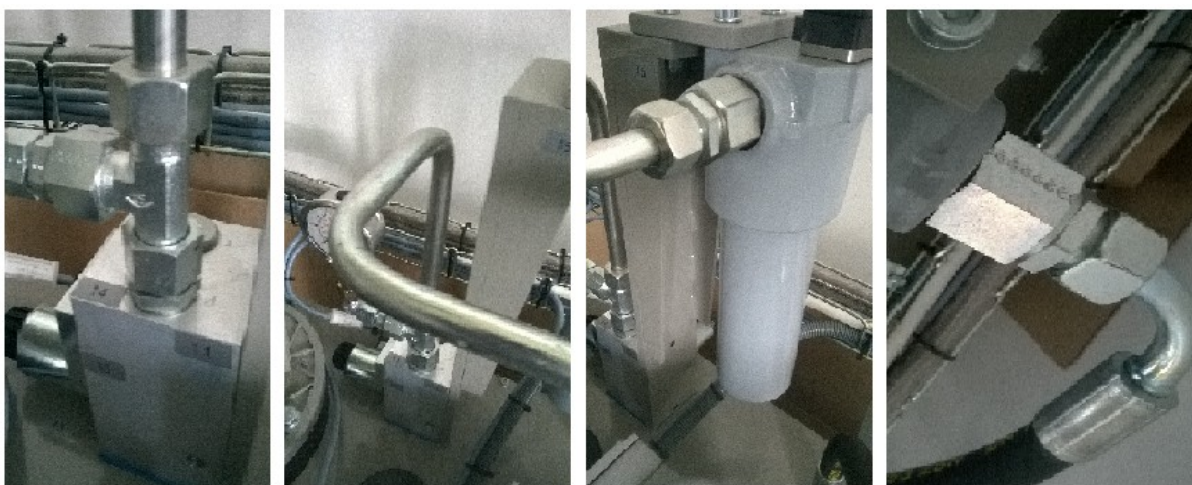
Odhadem mechanických parametrů bylo docíleno přibližné shody mezi naměřeným průběhem a simulovaným průběhem pozice pístu hydraulického válce. Na obr. 41 je vidět, že úroveň akčního zásahu je limitována blokem saturace. Na grafech z předchozí podkapitoly vidět jsou průběhy při omezení akčního zásahu úrovní ± 1 . Tato hodnota odpovídá plnému otevření (zavření) proporcionálního ventilu. Model je třeba rovněž otestovat při různých polohách šoupátka proporcionálního ventilu. Tím se docílí ověření přesnosti modelu proporcionálního ventilu. Na obr. 46 vlevo je vidět průběh aktuální polohy pístu při omezení akčního zásahu úrovní ± 0.7 , vpravo úrovní ± 0.3 . Z průběhu je zřejmé, že model je při těchto polohách šoupátka značně odlišný od reálné soustavy. Žlutá křivka představuje žádanou hodnotu, modrá představuje průběh změřený na reálné soustavě a fialová křivka představuje odezvu modelu.



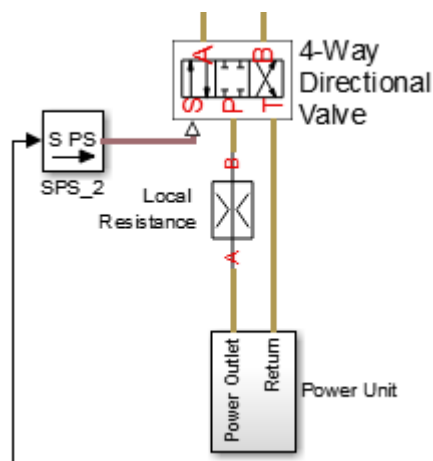
Obr. 46: Porovnání modelu soustavy s reálnou soustavou při saturaci akčního zásahu úrovní 0.7 vlevo a 0.3 vpravo.

Jedním z faktorů způsobujících odlišnost průběhů, je nepřesnost modelu ventilu, jež byl parametrován dle grafů uvedených v katalogovém listu výrobce ventilu. Tyto grafy jsou pouze přibližné a patrně nejsou zcela shodné s ventilem, jež je umístěn v reálném hydraulickém systému.

Dalším faktorem je absence některých hydraulických prvků v modelu soustavy. Jedná se o prvky, jejichž parametry nejsou známy a které mají vliv na činnost hydraulické soustavy. Jedná se například o filtr hydraulického oleje, připojovací desku, potrubí z hydraulické stanice k filtru, spojky mezi jednotlivými hydraulickými prvky atd. Fotografie výběru některých těchto prvků je znázorněna na obr. 47. Rozměry vnitřních průměrů těchto prvků a ostatní potřebné parametry nejsou k dispozici. Z těchto důvodů byly tyto všechny hydraulické prvky pro jednoduchost nahrazeny lokálním odporem, jak je uvedeno na obr. 48. K hodnotě lokálního odporu se dospělo stejně jako k mechanickým parametrům válce, tedy pomocí nástroje Parameter estimation.



Obr. 47: Fotografie hydraulických prvků, které nejsou součástí modelu.



Obr. 48: Připojení lokálního odporu k modelu hydraulického ventilu.

3.3.2.1 Změna typu parametrizace proporcionálního ventilu

Pro zvýšení přesnosti modelu, je třeba upravit parametry proporcionálního ventilu. Se současným typem parametrizace tlakově-průtokovou charakteristikou by bylo nutné změnit velké množství parametrů. Proto je vhodné model převést na model s parametrizací pomocí závislosti průřezu na poloze šoupátka.

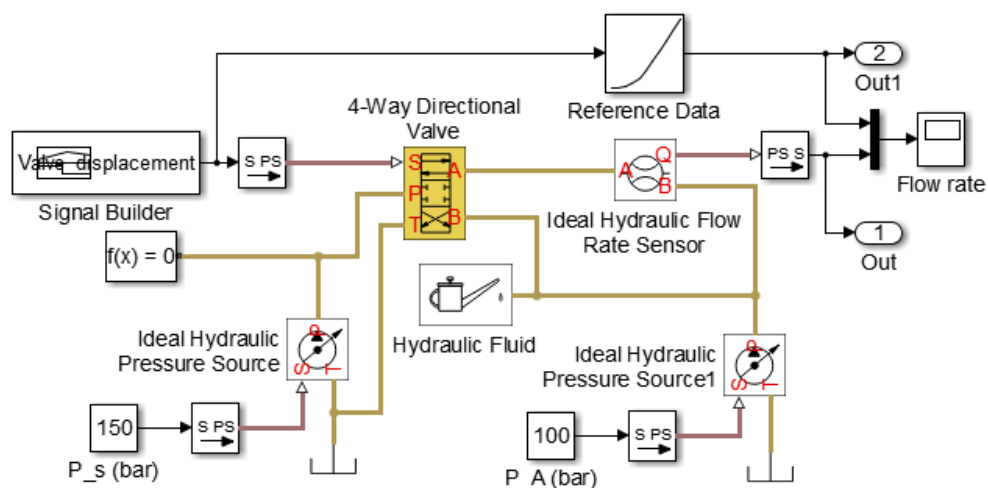
K převodu modelu ventilu mezi jednotlivými způsoby parametrizace byly upraveny scripty a schéma v Simulinku dostupné ze zdroje [28]. Scripty obsahují optimalizační funkci `fminunc()`, která minimalizací ztrátové funkce hledá jednotlivé průřezy ventilu tak, aby nově naparametrovaný ventil byl co nejvíce shodný s tím původním.

Nově parametrovaný model bude parametrován v jedenácti bodech, přičemž první bod se bude rovnat nule. Optimalizační funkce tedy bude hledat deset parametrů. Před počátkem optimalizace je nutné experimentálně zvolit těchto deset parametrů. Experimentálně zvolené parametry jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21: Experimentálně zvolené parametry proporcionálního ventilu.

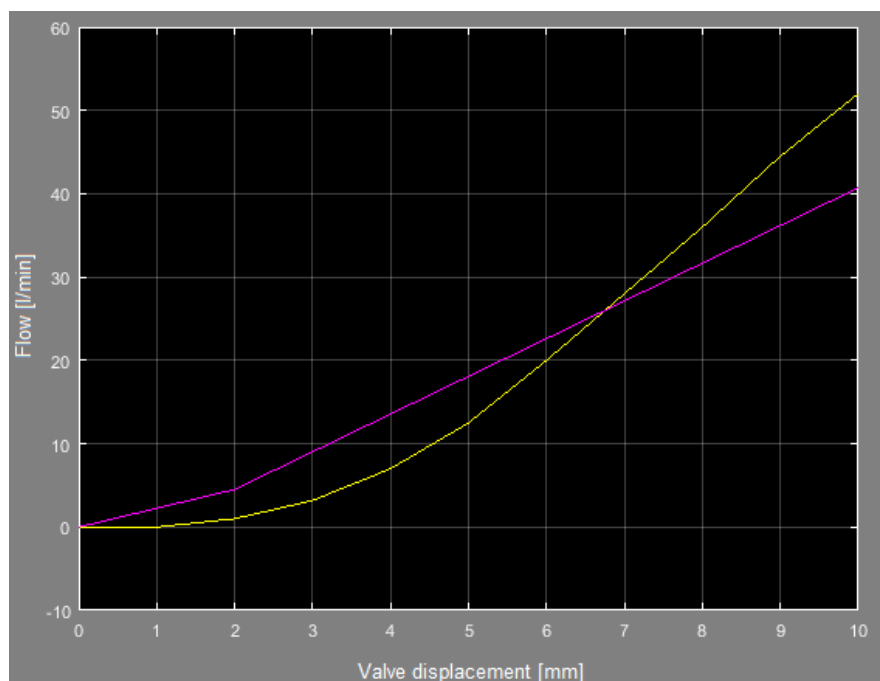
Poloha šoupátka [cm]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Průchozí plocha ventilu [cm ²]	0	0	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09

Pro optimalizaci parametrů a porovnání výsledků je použito schéma v simulinku uvedené na obr. 49. Průtočná charakteristika je uvedena pro diferenční tlak 50 bar.



Obr. 49: Schéma pro optimalizaci a porovnání výsledků při změně typu parametrizace proporcionálního ventilu.

Porovnání průtočné charakteristiky modelu původního ventilu s novým modelem s odhadem zvolenými parametry je uvedeno na obr. 50. Žlutá křivka představuje průtočnou charakteristiku původního modelu a fialová křivka představuje průtočnou charakteristiku nového modelu s odhadem stanovenými parametry.



Obr. 50: Porovnání průtočné charakteristiky modelů před optimalizací.

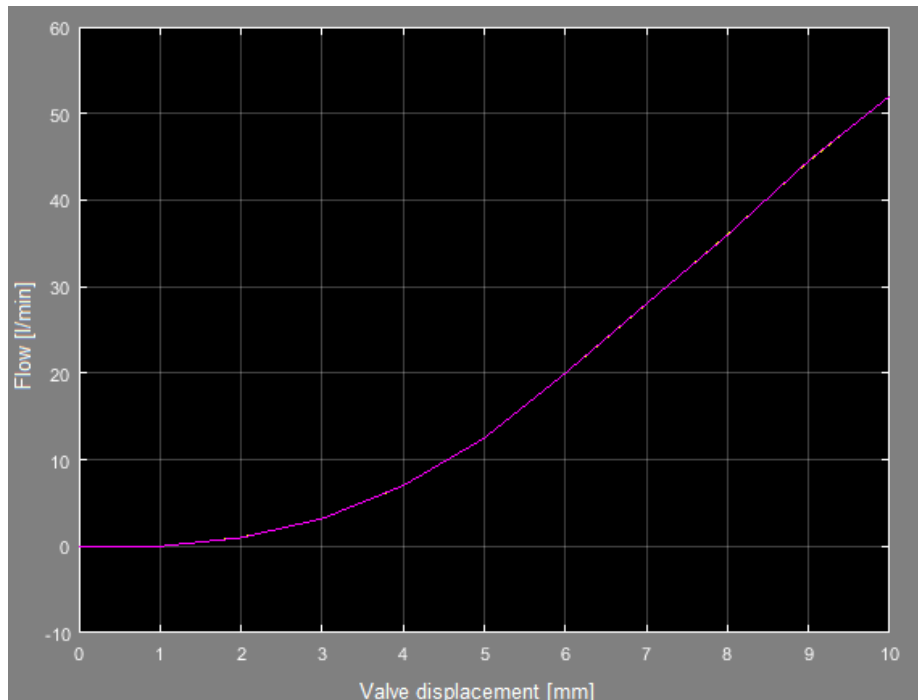
Následně se spustila optimalizace prostřednictvím scriptů uvedených v příloze A. Průběh optimalizace je patrný z obr. 51.

Iteration	Func-count	f (x)	Step-size	First-order optimality
0	12	154.683		3.48e+03
1	48	25.3006	6.86186e-06	1.85e+03
2	60	6.23144	1	943
3	72	1.68933	1	256
4	84	1.11597	1	148
5	96	1.0143	1	45.3

Obr. 51: Průběh optimalizace.

Tab. 22: Parametry proporcionálního ventilu získané optimalizací.

Poloha šoupátka [cm]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Průchozí plocha ventilu [cm ²]	0	2,7e-14	0,0022	0,007	0,015	0,027	0,044	0,061	0,070	0,098	0,115



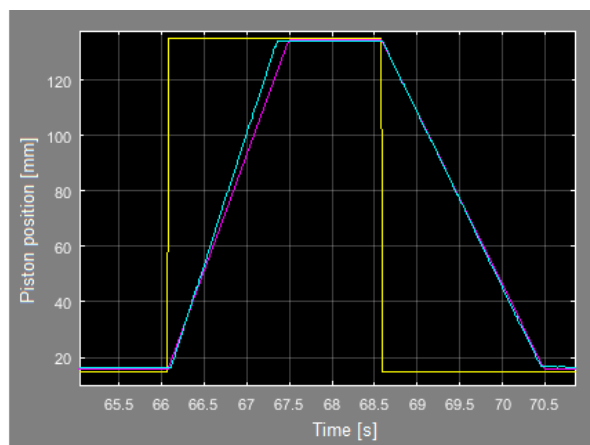
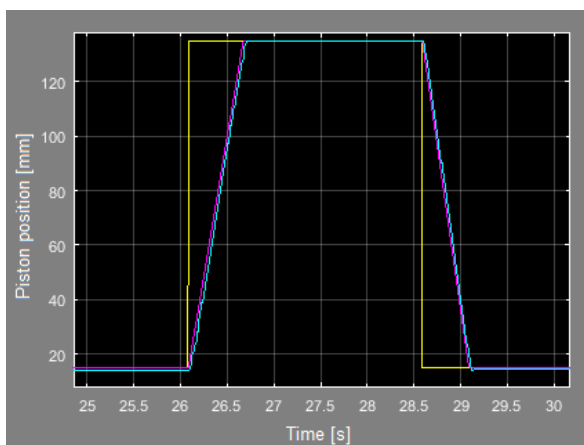
Obr. 52: Porovnání průtočné charakteristiky modelů po optimalizaci.

Model ventilu se zaměnil v obr. 41 za původní model ventilu. Průběhy aktuální polohy pístu byly téměř totožné jako průběhy s použitím předchozího modelu ventilu. Jedná se tedy o plnohodnotnou náhradu modelu. Nyní je možné přistoupit k ruční korekci průchozích ploch ventilu. Pro zvýšení přesnosti modelu došlo k rozšíření modelu a ten byl místo původních jedenácti parametrů parametrován pomocí jednadvaceti parametrů. Na reálné soustavě byly naměřeny průběhy polohy pístu hydraulického válce při různých saturačních úrovních akčního zásahu. Saturační úroveň se postupně měnila od hodnoty 1 až po hodnotu 0 s hodnotou kroku 0.05. Průběh polohy pístu před ruční korekcí a po ní je uveden v příloze B. Parametry po ruční korekci jsou uvedeny v tab. 23.

Tab. 23: Parametry modelu proporcionálního ventilu po ruční korekci.

Poloha šoupátka [cm]	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Průchozí plocha ventilu [cm ²]	0	0	0	0,00195	0,0073	0,0152	0,0231
Poloha šoupátka [cm]	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
Průchozí plocha ventilu [cm ²]	0,0317	0,0403	0,0588	0,0773	0,0861	0,0950	0,1094
Poloha šoupátka [cm]	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Průchozí plocha ventilu [cm ²]	0,1238	0,1414	0,1590	0,1576	0,1576	0,1765	0,1955

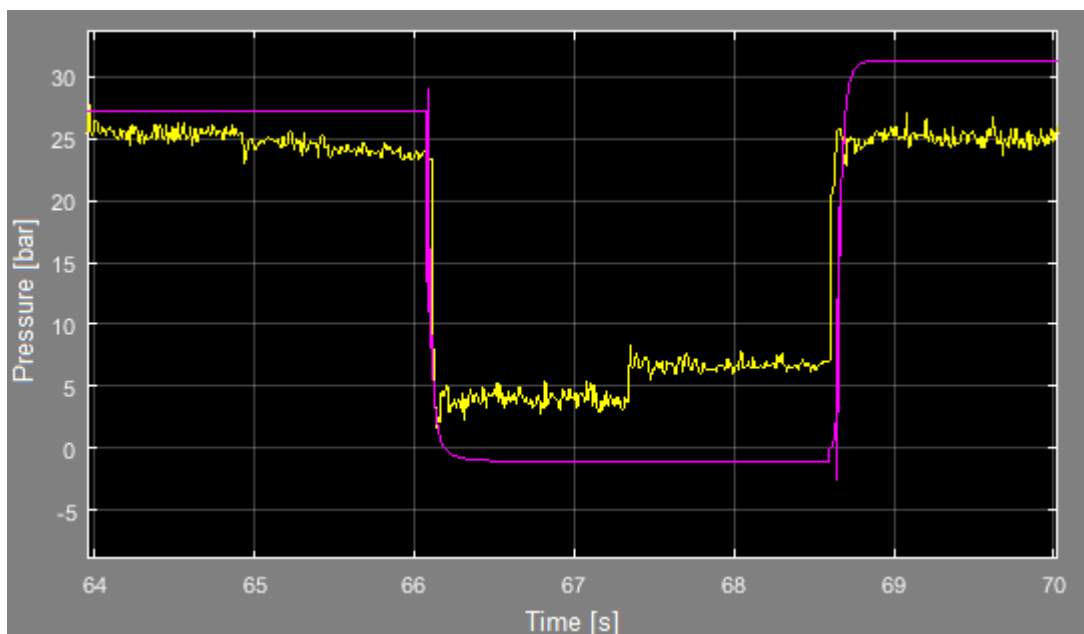
Touto úpravou ventilu se docílilo zpřesnění modelu při různých úrovních saturace akčního zásahu. Na obr. 53 vlevo je vidět průběh aktuální polohy pístu při omezení akčního zásahu úrovní ± 0.7 , vpravo úrovní ± 0.3 . Oproti průběhům z obr. 46 je zvýšení přesnosti modelu patrné. Žlutá křivka představuje žádanou hodnotu, modrá představuje průběh změřený na reálné soustavě a fialová křivka představuje odezvu modelu.



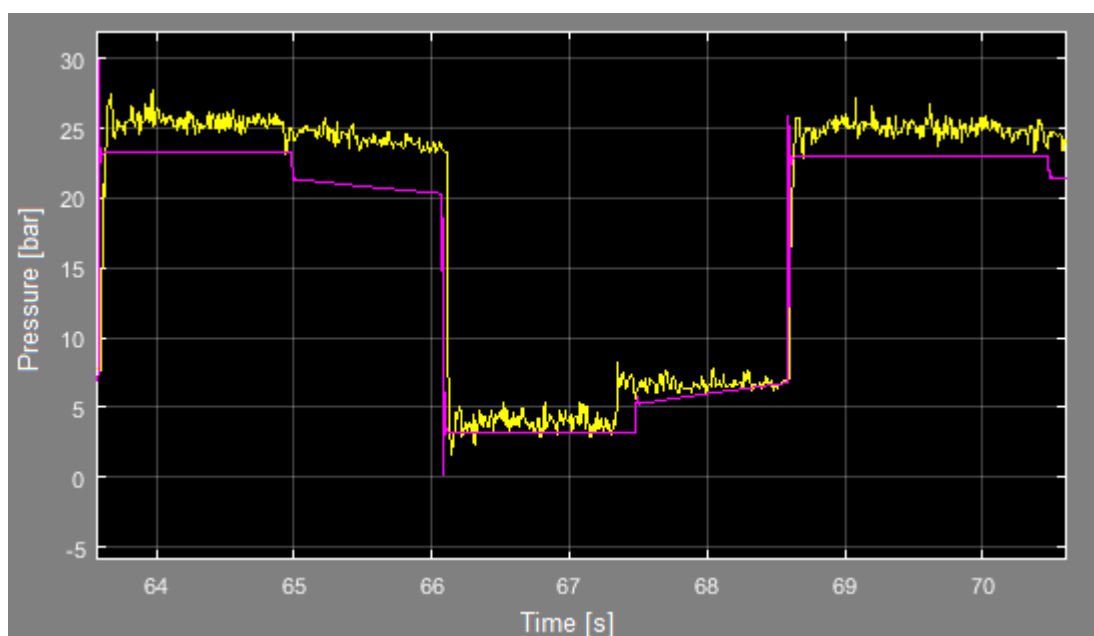
Obr. 53: Porovnání modelu soustavy s reálnou soustavou při saturaci akčního zásahu úrovní 0.7 vlevo a 0.3 vpravo po korekci modelu ventilu.

Při původním modelu byly i průběhy tlaků v obou komorách poměrně odlišné. Po úpravě se dosáhlo větší shody mezi modelem a reálnou soustavou. Nepřesnost mezi změřeným a simulovaným průběhem je patrně způsobena absencí modelů některých hydraulických prvků, jak již bylo popsáno

dříve v této kapitole. V reálné soustavě je tlak měřen v komoře A i B. Pro zjednodušení bude porovnáván diferenční tlak, tedy rozdíl tlaků v komoře B a A. Žlutá křivka představuje průběh změřený na reálné soustavě a fialová křivka představuje odezvu modelu.



Obr. 54: Porovnání diferenčního tlaku v komorách B a A před korekcí parametrů proporcionálního ventilu. Měření i simulace byla provedena při saturaci akčního zásahu úrovní 0.3.



Obr. 55: Porovnání diferenčního tlaku v komorách B a A po korekci parametrů proporcionálního ventilu. Měření i simulace byla provedena při saturaci akčního zásahu úrovní 0.3.

4. Linearizace soustavy

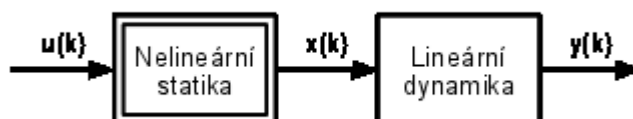
Lineární systémy jsou popsány lineárními diferenciálními rovnicemi. Lineární systémy mohou být poměrně snadno řešitelné. Reálné systémy jsou však zásadně systémy nelineárními. Záleží na míře nelinearity konkrétního systému. Je-li nelinearita systému mírná, lze s určitou nepřesností tento systém považovat za lineární a aplikovat na něj metody určené pro lineární systémy. Pokud však nelinearita systému dosáhne určité meze, je nutné přistoupit k linearizaci.

Nelineární regulační obvod je takový, kdy alespoň jeden z jeho prvků je nelineární. Je-li statická charakteristika některého prvku soustavy přímka, jedná se o lineární prvek soustavy. V opačném případě se jedná o nelineární člen soustavy. [29]

Jedním z přístupů řešení nelineárních obvodů je linearizace obvodu v pracovním bodě a pro tuto oblast navrhnout regulátor. Tento přístup však vykazuje vhodné výsledky jen v blízkém okolí pracovního bodu. Jedním z dalších přístupů je linearizace statické charakteristiky po částech. U tohoto přístupu se statická charakteristika rozdělí do několika "lineárních" oblastí a pro tyto oblasti se navrhnou vhodné regulátory. Je patrné, že tento přístup vede na návrh několika regulátorů, což je nevýhodou u tohoto přístupu. V praxi často používaným a poměrně jednoduchým přístupem je použití Hammersteinova modelu pro návrh vhodného regulátoru. [30]

4.1 Hammersteinův model

Hammersteinův model vychází z předpokladu, že nelineární systém lze rozdělit na nelineární statickou část a lineární dynamickou část. Tento předpoklad bývá často splněn u typu systému, jejichž dominantní nelinearita je způsobena na vstupu (Hammersteinův model) nebo výstupu soustavy (Wienerův model). Je tedy způsobena nelinearitou statické charakteristiky aktuátoru nebo nelinearitou statické charakteristiky snímače procesní veličiny. V reálné soustavě se předpokládá, že dominantní nelinearita je způsobena nelinearitou statické charakteristiky proporcionálního ventilu, a proto bude použit Hammersteinův model. Struktura Hammersteinova modelu je znázorněna na obr. 56. [31]

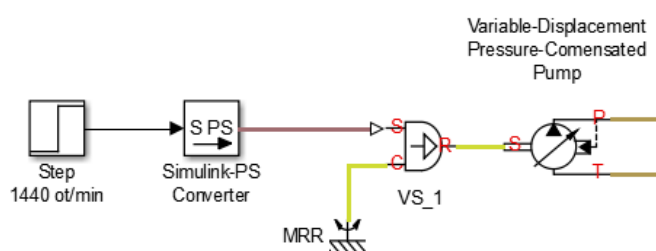


Obr. 56: Struktura Hammersteinova modelu. [30]

4.2.1 Statická charakteristika modelu

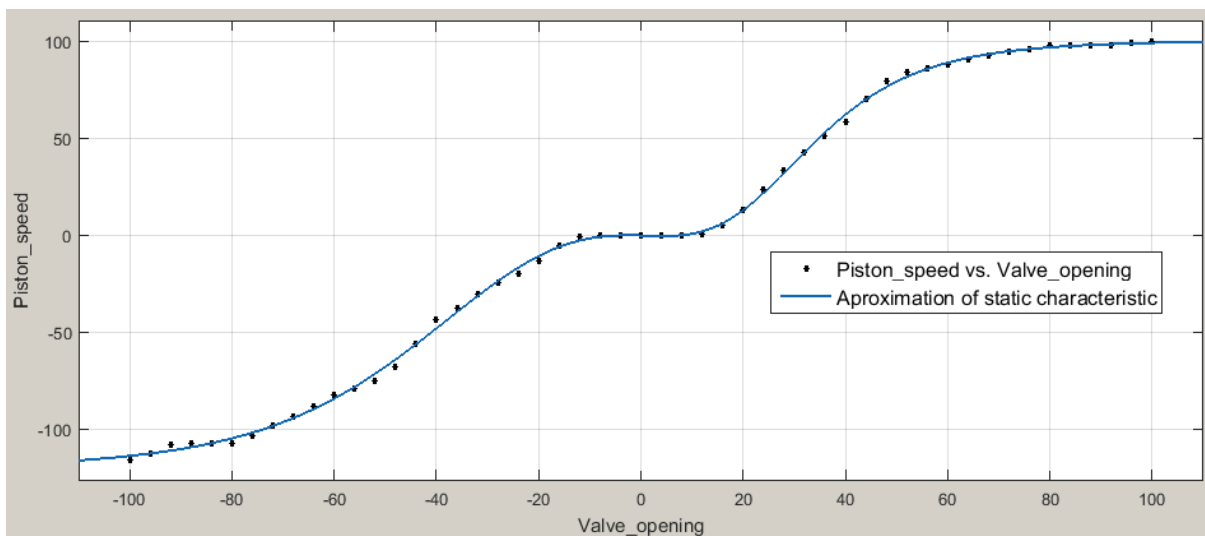
Statická charakteristika je závislost výstupní veličiny na veličině vstupní v ustáleném stavu. V tomto případě bude vstupní veličinou procentuální otevření proporcionálního ventilu (akční veličina vypočtená regulátorem) a výstupní veličinou bude rychlost pohybu pístu hydraulického válce, která je přímo úměrná objemovému průtoku hydraulického válce.

Statickou charakteristiku je možné získat například z modelu hydraulické soustavy. Pro účely získání statické charakteristiky soustavy bylo upraveno schéma z obr. 41. Ze schématu bylo nutné eliminovat všechny prvky, jež mají zásadní vliv na dynamické chování systému. Bylo nutné eliminovat dynamické vlastnosti proporcionálního ventilu a indukční motor nahradit ideálním zdrojem otáček jak je naznačeno na obr. 57. Dále bylo nutné uměle navýšit zdvih hydraulického válce, aby při simulaci nedošlo k dosažení krajní polohy válce.



Obr. 57: Eliminace vlivu indukčního motoru nahrazením ideálního zdroje otáček.

Získaná statická charakteristika je znázorněna na obr. 58. Při otevření ventilu na zhruba 75 % je patrné, že se rychlost pohybu pístu hydraulického válce už dále nezvyšuje. To je zapříčiněno maximálním průtokem čerpadla, jež je schopno generovat maximální průtok okolo 15 l/min, který při průřezu válce 40 mm odpovídá rychlosti pohybu válce zhruba 0,22 m/s. Osa y na charakteristice na obr. 58 ovšem není zobrazena v jednotkách m/s, ale v %. To z důvodu pozdější kompenzace statické charakteristiky. Převodu na % bylo docíleno vynásobením původní rychlosti hodnotou 461,9.



Obr. 58: Aproximace statické charakteristiky hydraulické soustavy s použitím nástroje Curve Fitting Tool.

Získanou statickou charakteristiku bylo nutné aproximovat. K tomuto účelu byl použit nástroj Matlabu s názvem Curve Fitting Tool. Získané statické charakteristice nejlépe z nabízených funkcí odpovídala racionální funkce s pátým stupněm v čitateli i čtvrtým stupněm ve jmenovateli. Obecný tvar této funkce popisuje rovnice (2).

$$f(x(t)) = \frac{p_1 * u(t)^5 + p_2 * u(t)^4 + p_3 * u(t)^3 + p_4 * u(t)^2 + p_5 * u(t) + p_6}{u(t)^4 + q_1 * u(t)^3 + q_2 * u(t)^2 + q_3 * u(t) + q_4} \quad (2)$$

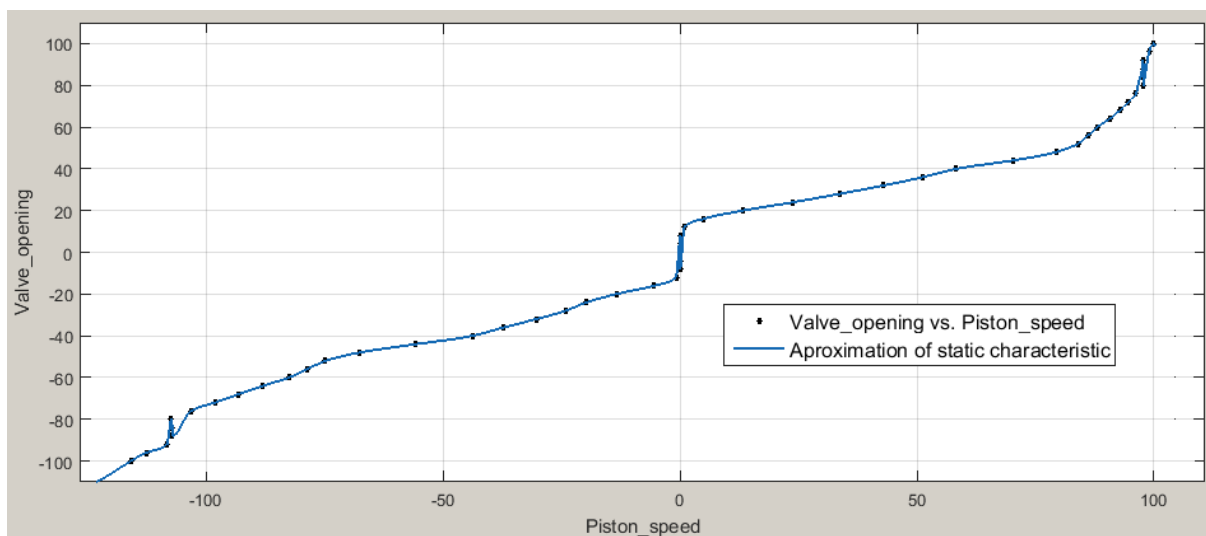
Parametry funkce (2) získané pomocí nástroje Curve Fitting Tool jsou uvedeny v tab. 24.

Tab. 24: Parametry funkce statické charakteristiky hydraulické soustavy.

p1	p2	p3	p4	p5	p6
0.3609	-0.8464	1.147e+04	-2.869e+04	-3.836e+05	-6.757e+05
q1	q2	q4	q5		
15.4	3589	-9.198e+04	5.761e+06		

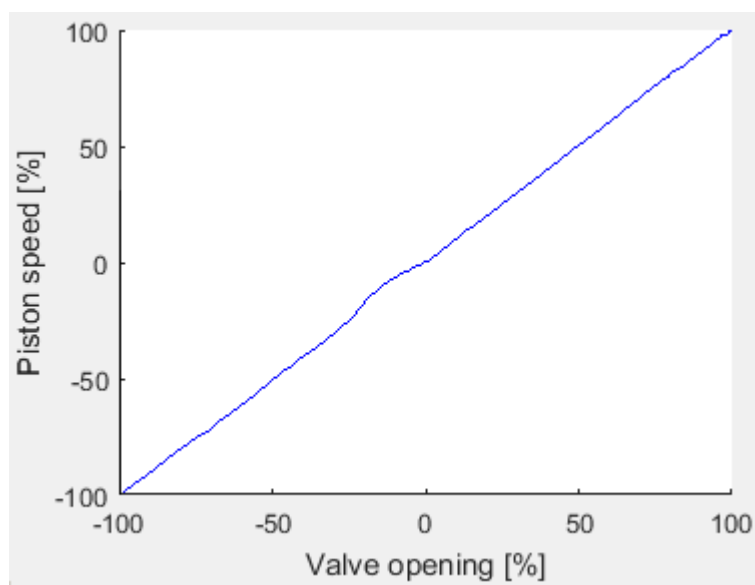
Funkci, která “narovnává” statickou charakteristiku je možné získat tak, že v nástroji Curve Fitting Tool zaměníme data osy x a y. Vzhledem ke tvaru funkce, není možné získat aproximaci této funkce polynomickou ani racionální funkcí takového řádu, jež nabízí nástroj Curve Fitting Tool. Řád aproximační funkce by byl příliš vysoký. Aproximace byla provedena prostřednictvím lineární

interpolace, jak je znázorněno na obr. 59. Implementace linearizační funkce do PLC je uvedena v příloze C.



Obr. 59: Průběh funkce, jež linearizuje statickou charakteristiku soustavy.

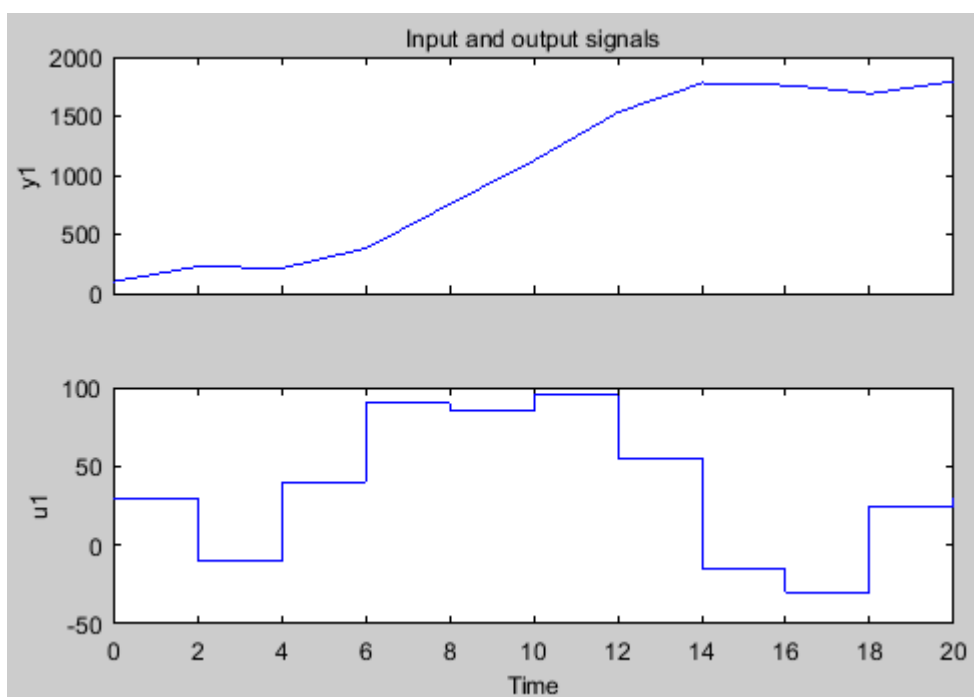
Do modelu hydraulické soustavy, ze kterého byla získána statická charakteristika soustavy, byla zařazena funkce pro linearizaci statické charakteristiky. Tato funkce byla zařazena za blok regulátoru. Nově získaná statická charakteristika je znázorněna na obr. 60.



Obr. 60: Statické charakteristika hydraulické soustavy po linearizaci.

4.2.2 Identifikace lineární dynamické části modelu

Aby bylo možné identifikovat pouze lineární dynamickou část modelu, je nutné na soustavu aplikovat linearizační funkci uvedenou v předchozí podkapitole. Identifikovat dynamickou část modelu je možné například pomocí nástroje System Identification. Pomocí bloku repeating sequence stair byl vygenerován signál, jež je přiveden na vstup soustavy (řídící elektroniku proporcionálního ventilu) a na výstupu soustavy (aktuální poloha pístu hydraulického válce) byl měřen výstupní signál. Průběh vstupního ($u1$ [%]) a výstupního ($y1$ [mm]) signálu v závislosti na čase [s] je znázorněn na obr. 61. Zdvih hydraulického válce byl uměle navýšen, aby nedošlo k dosažení krajní polohy pístu hydraulického válce.



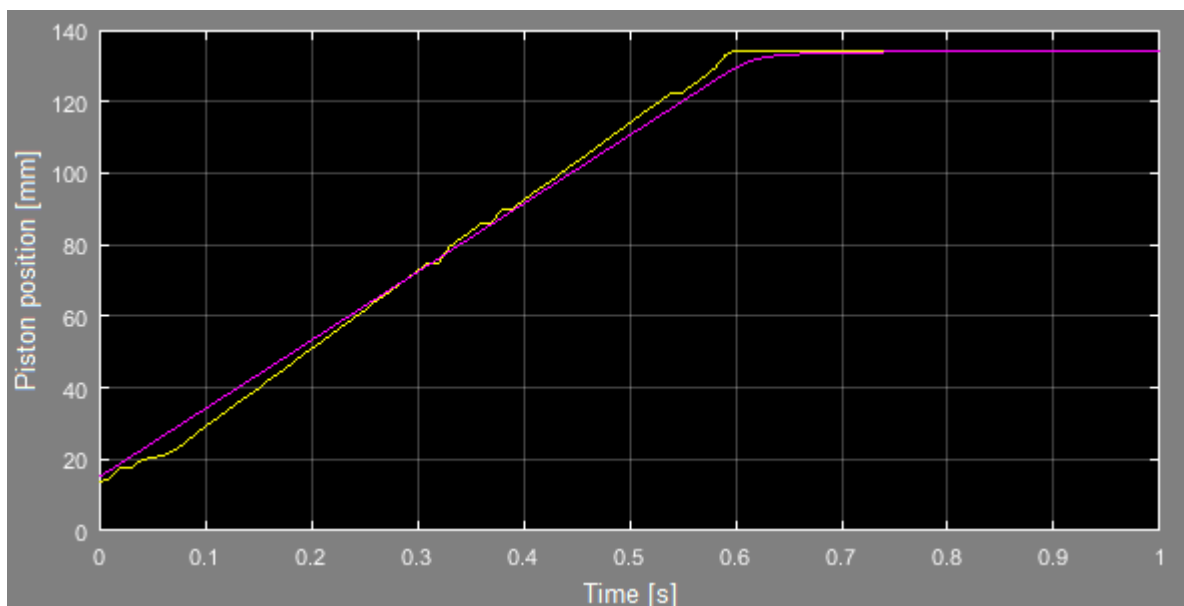
Obr. 61: Průběh vstupního a výstupního signálu hydraulické soustavy.

Z principu činnosti hydraulické soustavy vyplývá, že se bude jednat o integrační soustavu, která je popsána přenosem ve tvaru (3). V nástroji System Identification proto tedy budeme hledat parametr zesílení.

$$G(s) = \frac{K_P}{s} \quad (3)$$

Nástroj System Identification vypočetl hodnotu zesílení $K_P = 1.92627$. Shoda mezi výstupem reálné soustavy a výstupem modelu činí 97,89%. Dosadí-li se tento přenos do zpětnovazebního regulačního obvodu s P regulátorem se zesílením 10, a mezi regulátor a model soustavy se zařadí aproximovaná funkce statické charakteristiky, docílí se obdobných podmínek, za jakých byl měřen

výstup reálné soustavy. Na obr. 62 je porovnání výstupu reálné soustavy (žlutě) a výstupu modelu (fialově). Na ose x je čas v s a na ose mm aktuální poloha pístnice hydraulického válce v mm.

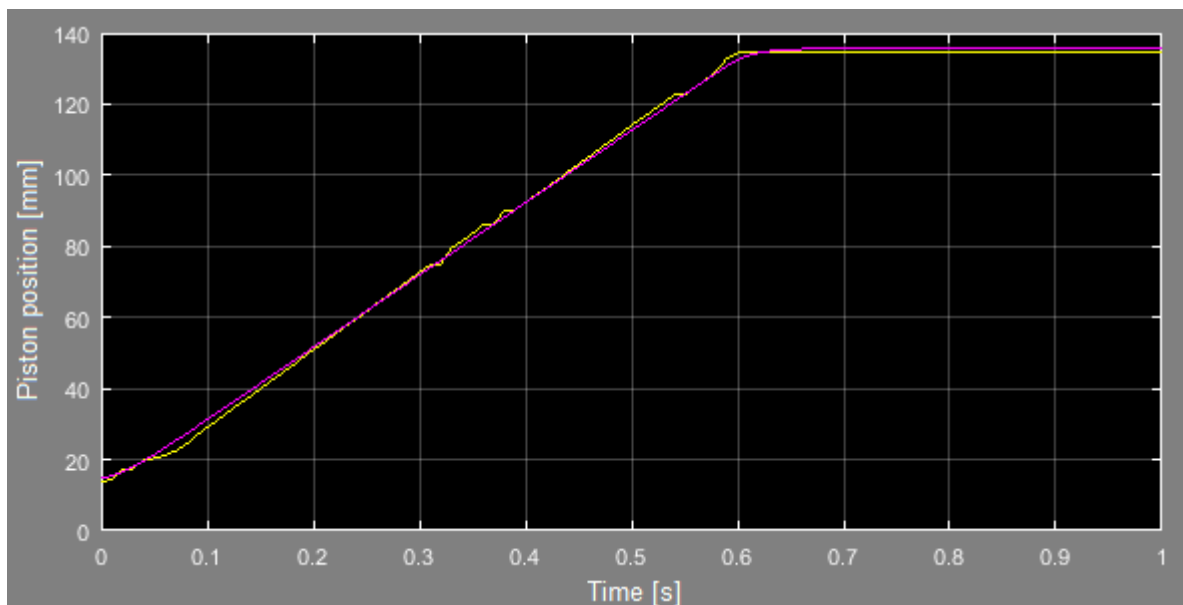


Obr. 62: Přechodová charakteristika při použití modelu integrační soustavy.

Z přechodové charakteristiky na obr. 62 je patrná, že model odezva modelu je lehce odlišná od odezvy reálné soustavy. To je způsobeno absencí setrvačného členu ve jmenovateli přenosu soustavy. Jelikož nástroj System Identification při použití v této verzi neumožňuje identifikovat soustavu v takovémto tvaru, bylo přistoupeno k ruční korekci přenosu. Přenos modelu integrační soustavy se setrvačností bude tedy ve tvaru:

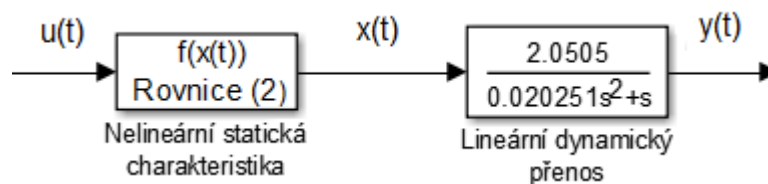
$$G(s) = \frac{K_p}{s(1 + T_p s)} \quad (4)$$

Reálné soustavě nejlépe odpovídal model s parametry: $K_p = 2.0505$ a $T_p = 0.020251$. Přechodová charakteristika s modelem integrační soustavy se setrvačností je znázorněna na obr. 63. Při porovnání přechodových charakteristik je patrné, že přidáním setrvačného členu do jmenovatele přenosu se dosáhlo zvýšení přesnosti modelu.



Obr. 63: Přejchodová charakteristika při použití modelu integrační soustavy se setrvačností.

Výsledný Hammersteinův model je znázorněn na obr. 64. Model se skládá z nelineární statické charakteristiky a z lineárního dynamického přenosu. Regulátor pro tento typ soustav se poté navrhuje pouze pro lineární dynamický přenos, jelikož nelineární statická charakteristika je kompenzována její inverzní funkcí.



Obr. 64: Hammersteinův model hydraulické soustavy.

5. Analýza regulačních smyček soustavy a syntéza regulátoru

V průmyslu je pro zpětnovazební regulaci nejčastěji využíváno konvenčních regulátorů. Jedná se o PID regulátory (případně jen některé jeho složky) a jeho modifikace. Rovněž firma Ingeteam a.s. upřednostňuje při regulacích použití konvenčních PID regulátorů.

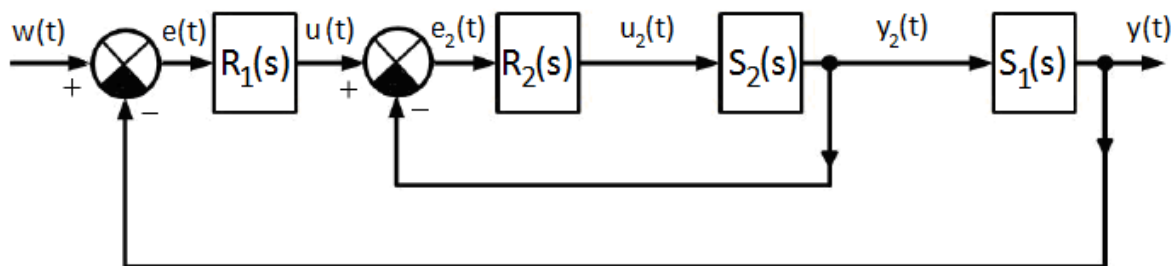
Při řízení reálných soustav narážíme na řadu principiálních a technických problémů.

- Každá reálná soustava je nelineární (záleží na konkrétní situaci a typech nelinearit, které se u dané soustavy vyskytují).
- Realizace regulátoru na konkrétní platformě (hardwaru) zřídka vede na práci se spojitými tvary pro popis činnosti regulátoru.
- Zdaleka ne u všech systémů se podaří odvodit matematický model odpovídající vnějšímu nebo vnitřnímu popisu systému.

[21]

5.1 Model soustavy hydraulických válců

Regulační úlohou je regulovat polohu hydraulického pístu prostřednictvím hydraulického válce. Regulační obvod se skládá z dvou regulačních smyček. Tento obvod se nazývá rozvětvený regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou. Tyto obvodu budou v hydraulické soustavě uplatněny dva. Jelikož máme k dispozici soustavu dvou proporcionálních ventilů a dvou hydraulických válců. Tedy pro každý hydraulický válec řízený proporcionálním ventilem bude uplatněna jedna struktura regulačního obvodu uvedena na obr. 65.



Obr. 65: Struktura regulačního obvodu.

$w(t)$ – Žádaná pozice pístu hydraulického válce.

$y(t)$ – Aktuální pozice pístu hydraulického válce.

$e(t)$ – Regulační odchylka vnější smyčky. Rozdíl žádané a skutečné pozice pístu hyd. válce.

$u(t)$ – Akční zásah vypočtený regulátorem R_1 . Je zároveň řídicí veličinou vnitřní smyčky (žádaná poloha šoupátka proporcionálního ventilu).

$y_2(t)$ – Aktuální pozice šoupátka proporcionálního ventilu.

$e_2(t)$ – Regulační odchylka vnitřní smyčky. Rozdíl žádané a skutečné pozice šoupátka.

$u_2(t)$ – Akční zásah vypočtený regulátorem R_2 .

Popis vnitřní regulační smyčky

Vnitřní smyčka odpovídá regulaci polohy šoupátka proporcionálního ventilu. Regulátor s přenosem $R_1(s)$ vypočte akční zásah, od něj se odečte aktuální poloha šoupátka ventilu, čímž se získá regulační odchylka $e_2(t)$. Tato regulační odchylka vstupuje do regulátoru s přenosem $R_2(s)$. Ten vypočte akční zásah, který se převede na pulzní proud působící na cívky proporcionálního ventilu a tím dochází k regulaci polohy šoupátka na žádanou pozici.

Regulace vnitřní smyčky je realizována prostřednictvím integrované elektroniky ventilu (YV2) či prostřednictvím regulační karty Rexroth (YV3). V nadřazeném řídicím systému (PLC) je zadávána žádaná pozice šoupátka ventilu prostřednictvím analogového výstupu a prostřednictvím analogového vstupu získáváme informaci o aktuální pozici šoupátka.

Popis vnější regulační smyčky

Vnější smyčka odpovídá regulaci polohy pístu hydraulického válce. Na vstup obvodu je přivedena žádaná poloha pístu hydraulického válce. Od ní je odečtena skutečná poloha pístu. Získaná regulační odchylka vstupuje do regulátoru s přenosem $R_1(s)$. Ten vypočte akční zásah, jenž je zároveň řídicí veličinou vnitřní regulační smyčky. Pozicí šoupátka proporcionálního ventilu dojde k ovlivnění průtoku ventilem, čímž dochází k vychýlení polohy pístu hydraulického válce.

Regulace této smyčky je na rozdíl od regulace vnitřní smyčky realizována prostřednictvím PLC.

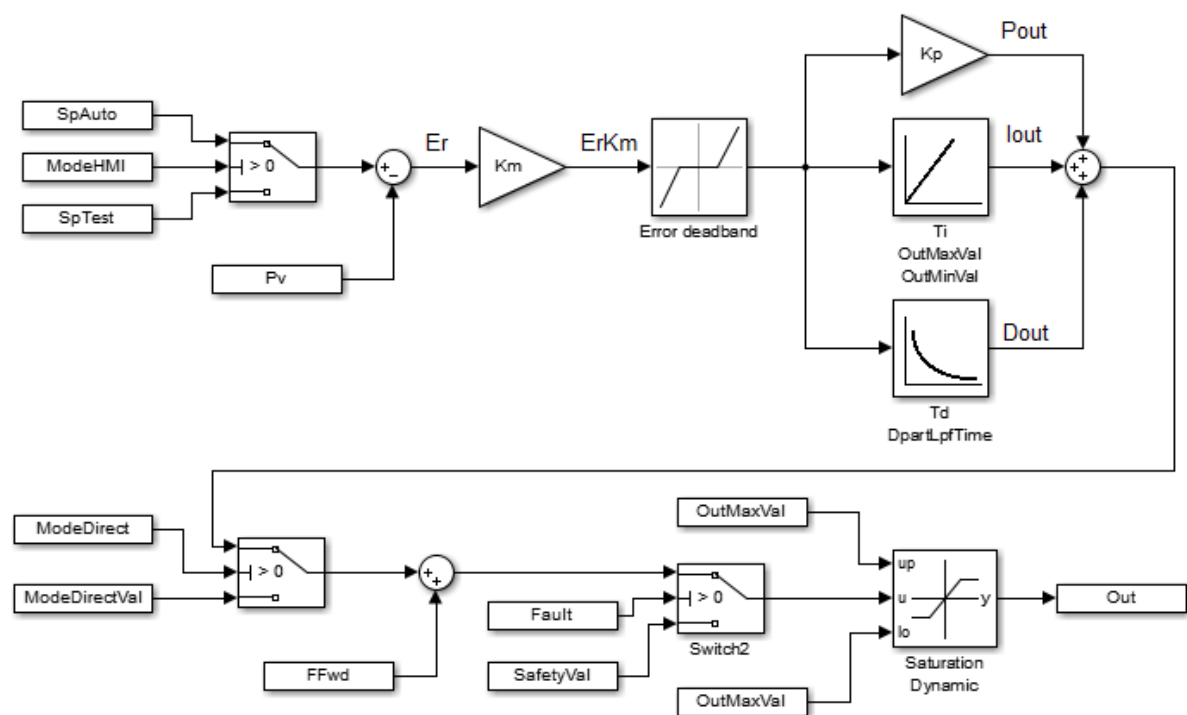
5.2 Rozbor PID regulátoru vyvinutého firmou Ingeteam a.s.

Jedná se o PID regulátor v paralelním tvaru. Přenos spojitého PID regulátoru v paralelním tvaru je vyjádřen rovnicí (5).

$$G_R(s) = r_p + \frac{r_I}{s} + r_D s \quad (5)$$

Výhodou takového tvaru PID regulátoru je absence interakce jednotlivých složek regulátoru. Obecně se tedy takový tvar regulátoru lépe ladí.

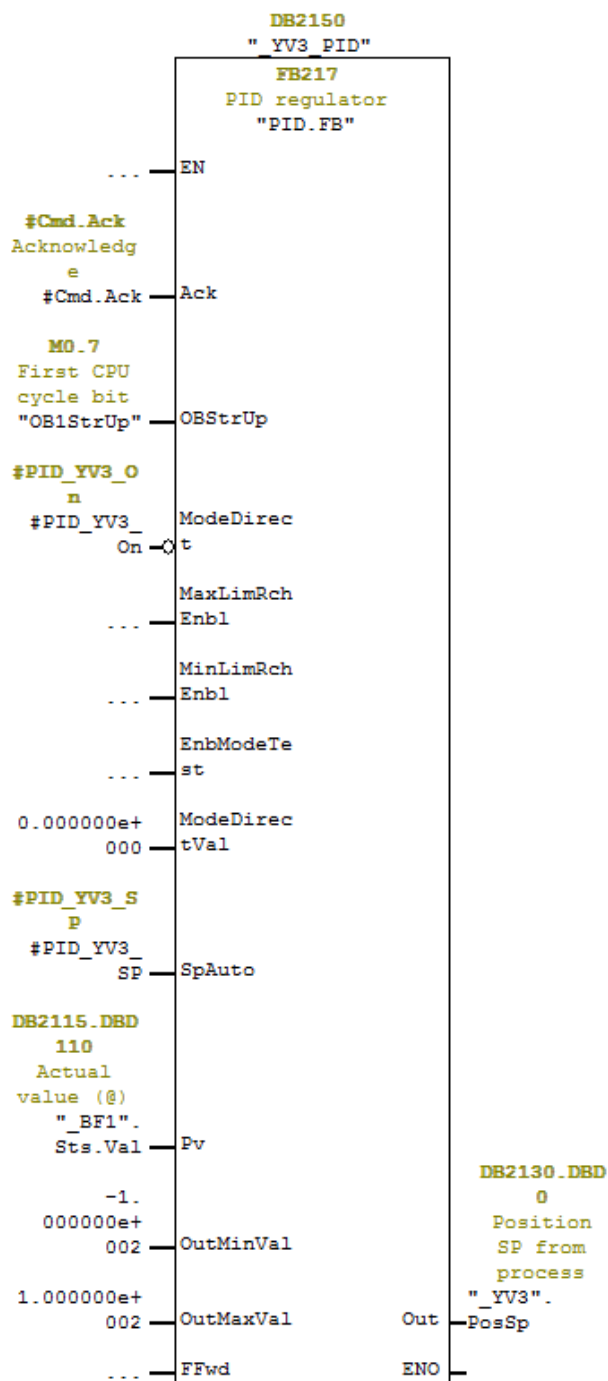
Struktura regulátoru vyvinutého firmou Ingeteam a.s. je uvedena na obr. 66.



Obr. 66: Struktura PID regulátoru firmy Ingeteam a.s.

PID regulátor vyvinutý firmou Ingeteam a.s. je schopen pracovat ve čtyřech režimech. Jsou to režimy Auto, Test, Direct, Safe. Safe mód je aktivní, vyhodnotí-li blok nějakou poruchu. Tento mód má nejvyšší prioritu. V případě vyhodnocení poruchy, nastaví blok na výstup hodnotu ze vstupu SafetyVal, čímž se docílí bezpečného stavu soustavy. Direct mód má druhou nejvyšší prioritu. Je-li tento mód aktivní, bude akční zásah regulátoru odpovídat hodnotě na vstupu ModeDirectVal. V případě test módu si operátor prostřednictvím vizualizace nastaví žádanou hodnotu a regulátor na základě regulační odchylky vypočte akční zásah. U auto módu se žádaná hodnota vypočítává prostřednictvím logických funkcí programovatelného automatu, operátor ji tedy nemůže měnit prostřednictvím vizualizace.

Na obr. 67 je vidět blok PID regulátoru v prostředí STEP7. Blok má několik vstupů a jeden výstup. Jediný výstup reprezentuje vypočtený akční zásah, jež vstupuje do soustavy.



Obr. 67: Obrázek bloku PID ve Step7.

V tab. 25 je uveden seznam vstupů PID bloku a jejich popis.

Tab. 25: Seznam vstupů bloku PID regulátoru.

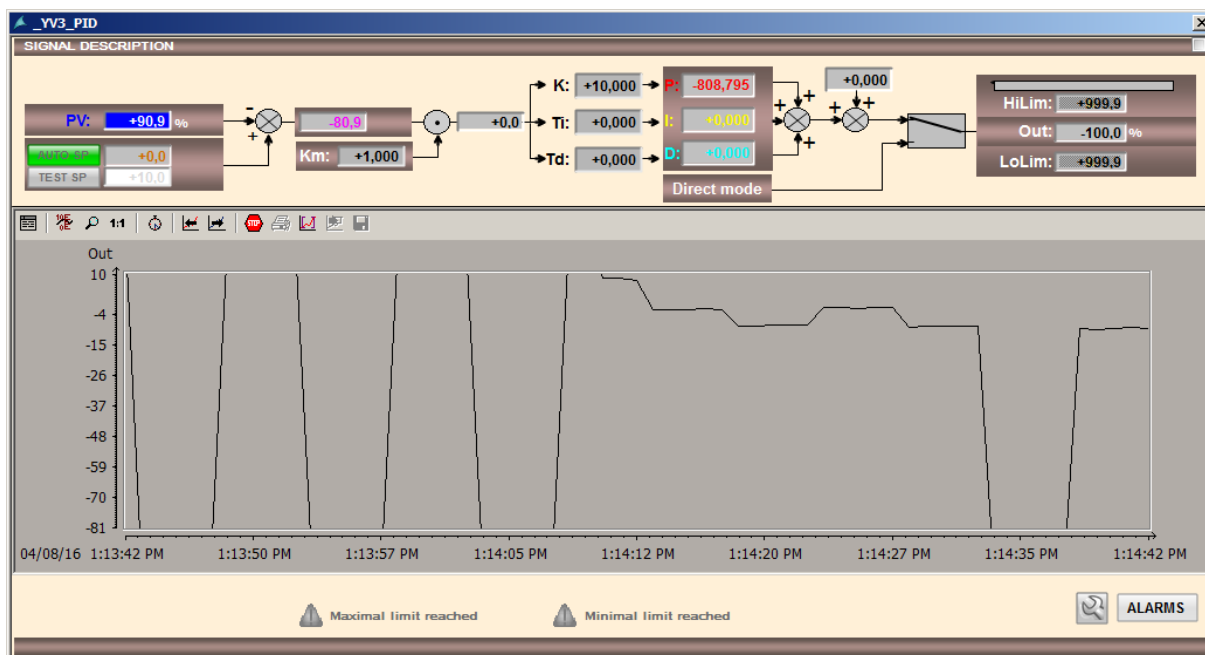
Symbol	Datový typ	Popis
Ack	bool	Potvrzení poruch
OBStrUp	bool	První cyklus PLC. Inicializace bloku.
ModeDirect	bool	Volba módu direct
MaxLimRchEnbl	bool	Povolení varování dosáhnutí max. limitu akčního zásahu
MinLimRchEnbl	bool	Povolení varování dosáhnutí min. limitu akčního zásahu
EnbModeTest	bool	Volba test módu
ModeDirectVal	real	Hodnota direct módu
SpAuto	real	Žádáná hodnota v automatickém režimu
Pv	real	Aktuální hodnota
OutMinVal	real	Minimální hodnota výstupu
OutMaxVal	real	Maximální hodnota výstupu
FFwd	real	Hodnota dopředné vazby

Parametry regulátoru lze nastavit prostřednictvím vizualizace. Seznam parametrů je uveden v tab. 26.

Tab. 26: Seznam parametrů regulátoru nastavovaných prostřednictvím vizualizace.

Parametr	Datový typ	Popis
RampOn	bool	Zapnutí rampy pro žádanou hodnotu
SpTest	real	Žádáná hodnota v test módu
Kr	real	Zesílení regulační odchylky
Kp	real	Zesílení proporcionální složky
Ti	real	Časová konstanta integrační složky
Td	real	Časová konstanta derivační složky
SpTestSpd	real	Rychlost rampy v testovacím módu [jednotka/1s]
ErrDdBnd	real	Šířka mrtvého pásma regulační odchylky
DpartLPFTime	real	Časová konstanta pro filtraci derivační složky
SafetyVal	real	Hodnota pro mód safe

Potvrzení poruch a přepínání mezi auto a test módem je realizováno prostřednictvím tlačítek ve vizualizaci. Na obr. 68 je vidět vyskakovací okno PID regulátoru, prostřednictvím kterého se nastavují parametry regulátoru. Ve spodní části obrazovky je vidět graf s nejdůležitějšími veličinami PID regulátoru.



Obr. 68: Ovládání PID regulátoru prostřednictvím vizualizace.

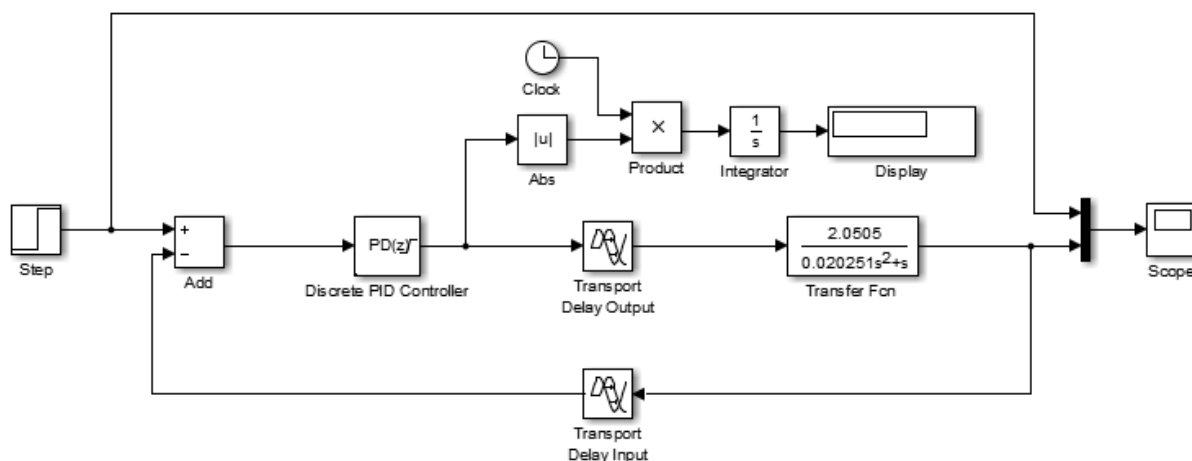
5.3 Ladění konstant regulátoru

Pro ladění konstant regulátoru bude použit lineární dynamický přenos, který je popsán v předchozí podkapitole. Pro porovnání kvality regulace při použití jednotlivých regulátoru bude použito kritérium ITAE. Výpočet kritéria ITAE je uvádí rovnice (6). U tohoto kritéria platí, že čím je jeho hodnota menší, tím je regulace kvalitnější.

$$ITAE = \int t |e(t)| dt \quad (6)$$

Hodnota kritéria bude počítána v simulaci regulačního obvodu v Simulinku. Schéma, ve kterém se budou porovnávat výsledky jednotlivých regulátoru, je uvedeno na obr. 69.

Do obvodu pro ladění konstant regulátoru byly zahrnuty i dva bloky dopravního zpoždění. Blok ve zpětné vazbě představuje dobu, než PLC přečte hodnoty na fyzických vstupech a následně je zkopíruje do obrazu vstupů. K tomuto času je ještě nutné připočítat dobu, než PLC dojde ke zpracování kódu konkrétního regulátoru. Obdobný význam má i dopravní zpoždění na výstupu regulátoru. Nicméně je tento čas ve většině případu kratší, jelikož obsahuje pouze čas mezi výpočtem akčního zásahu regulátoru a zapsání obrazu výstupů na fyzické výstupy. Jednotlivá dopravní zpoždění se pohybují v řádu jednotek až desítek ms. Dopravní zpoždění závisí na výkonnosti PLC, náročnosti řídicího programu, na umístění bloku regulátoru v programu a také na tom, kdy je cyklus PLC započat.

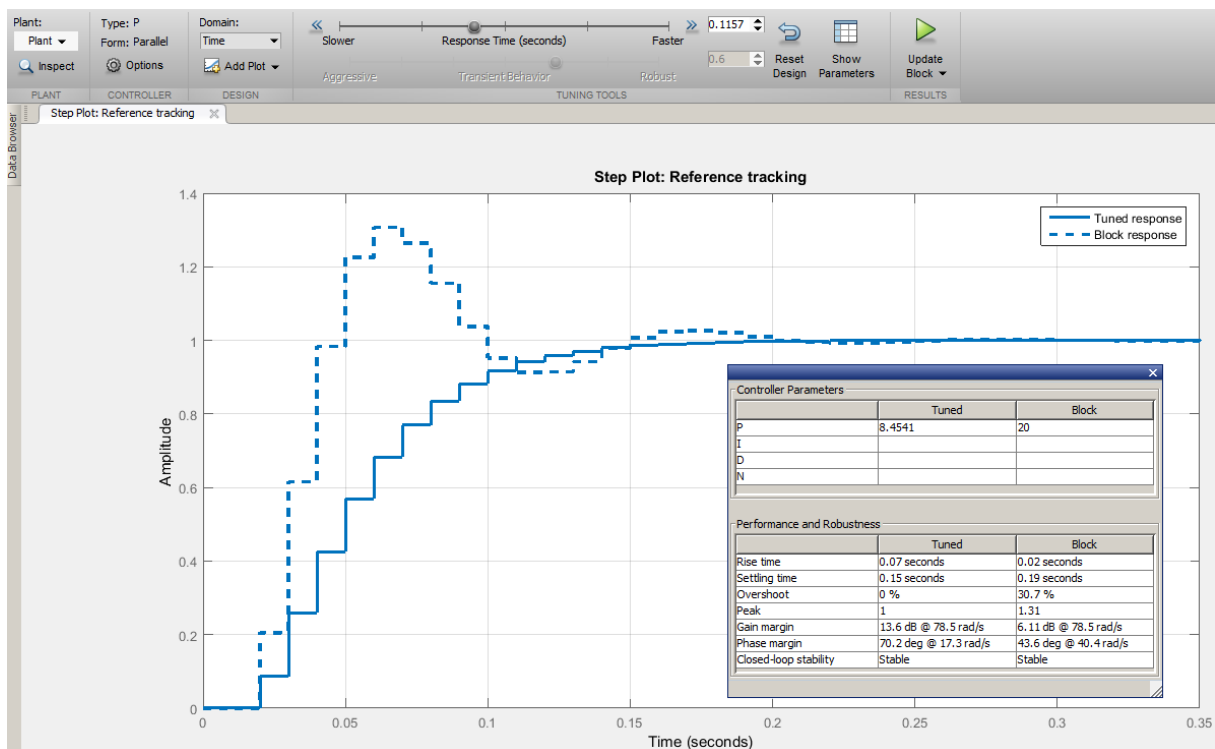


Obr. 69: Schéma pro srovnání různých regulátorů.

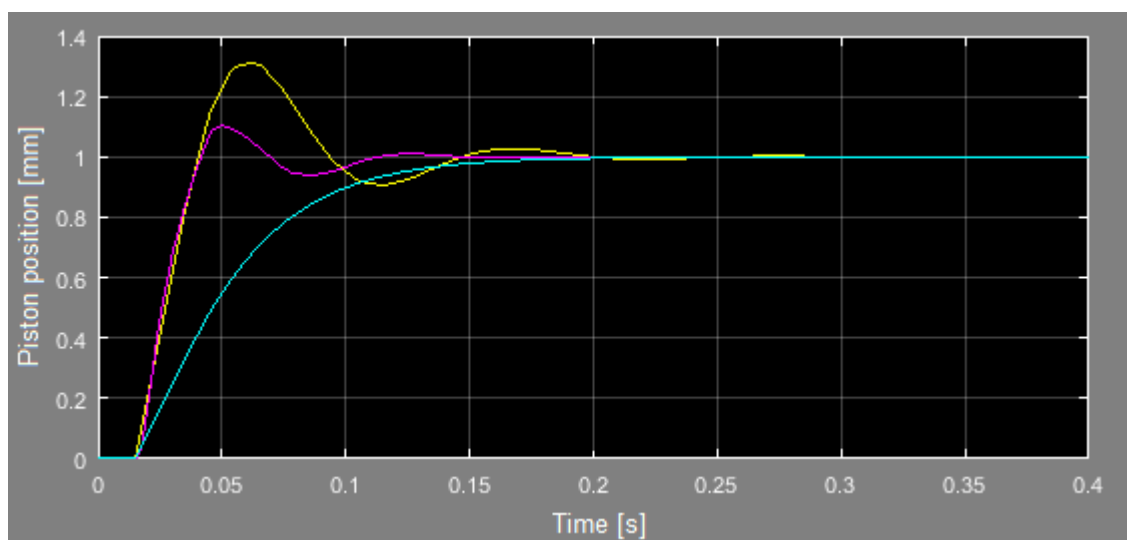
5.3.1 Nástroj Matlabu PID Tune

Matlab obsahuje nástroj PID Tuner pro ladění konstant regulátoru pro řízení lineárního modelu. Nástroj má grafické uživatelské rozhraní a je možné regulátor nastavit přesně dle našich požadavků. Vzhledem k tomu, že řídicím systémem soustavy je PLC, je nutné zvolit diskretní verzi regulátoru. Vzorkovací perioda byla zvolena 10ms. Nástroj umožňuje použít tyto typy regulátorů: P, S, PS, PD, PSD. Vzhledem k charakteru soustavy je použití integrační (sumační) složky regulátoru nevhodné, jelikož by měla nepříznivý vliv na kvalitu regulace. Zbývá tedy použít regulátor typu P nebo PD. Na obr. 70 je vidět ukázka použití nástroje PID tuner pro ladění konstant regulátoru.

Přechodová charakteristika s použitím regulátoru typu P je zobrazena žlutě a s použitím regulátoru typu PD fialově. Z obrázku je patrné, že regulátor typu PD vykazuje podstatně lepší kvalitu regulace. U aplikací, kdy se setkáváme s regulací polohy, existuje poměrně často požadavek, aby regulační děj neobsahoval žádný překmit. V tomto případě bude derivační konstanta nulová a získáme tedy regulátor typu P (modrá křivka).






Obr. 70: Ukázka použití nástroje PID Tuner.

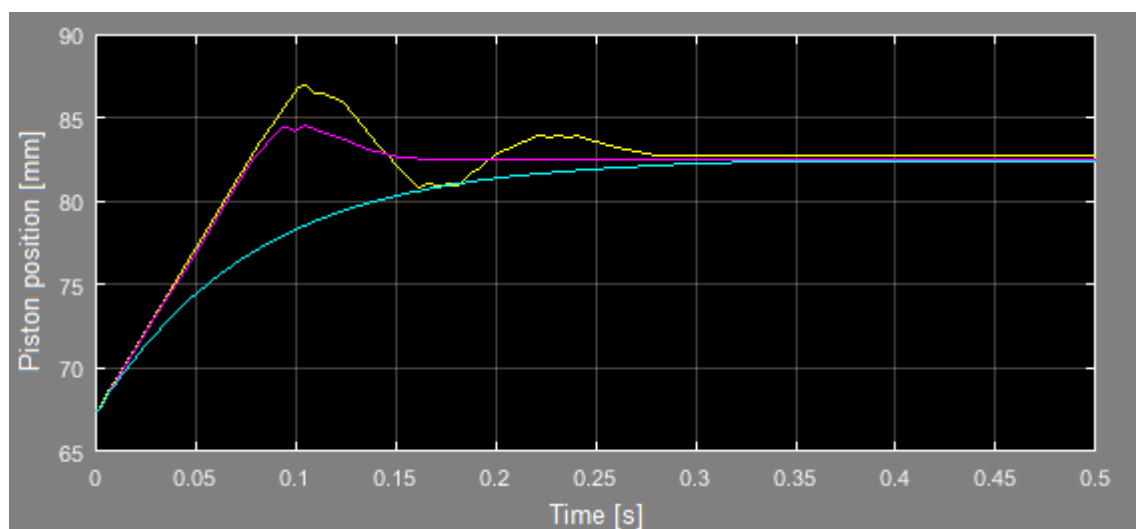


Obr. 71: Porovnání regulátorů typu P (s povoleným překmitem), PD při povoleném překmitu a P (bez překmitu).

Tab. 27: Porovnání jednotlivých regulátorů.

Typ regulátoru	Barva křivky	Překmit [%]	P	D	Doba ustálení [ms]	ITAE
P		30,7	20	-	190	0,00165
PD		10,5	15,45	0,13	110	0,000672
P		0	8,45	-	150	0,00192

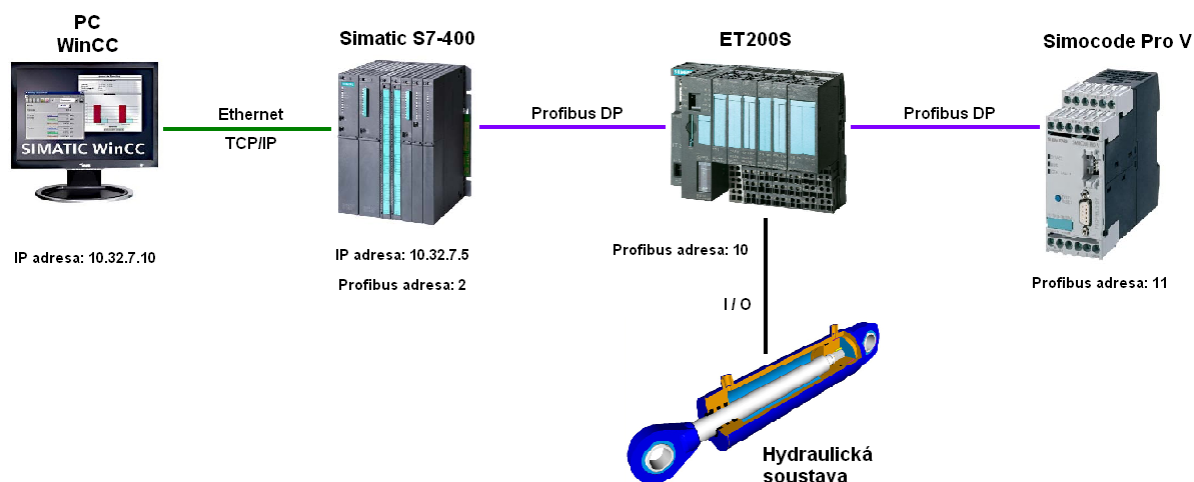
Jednotlivé regulátory byly i ověřeny na modelu vytvořeném pomocí toolboxu SimHydraulics. Žádanou veličinou byl skok v čase 0 z hodnoty 67,5 mm na hodnotu 82.5 mm. Přechodové děje pro jednotlivé regulátory lze vidět na obr. 72.



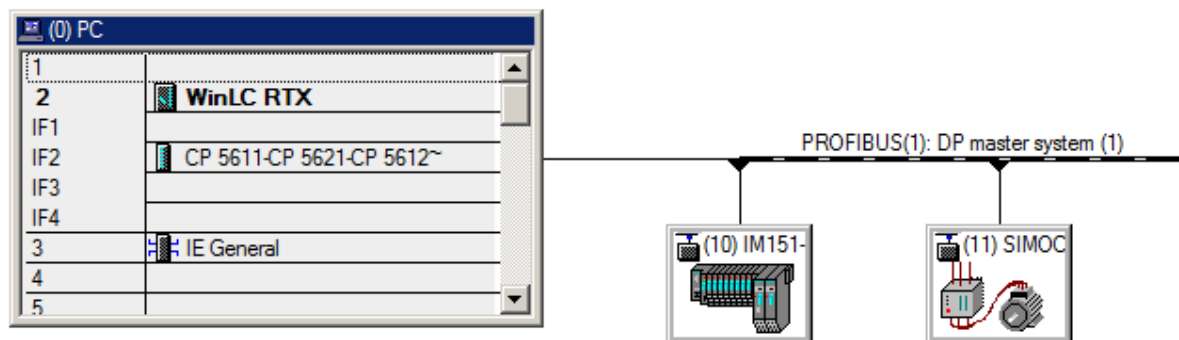
Obr. 72: Porovnání jednotlivých regulátorů na modelu, jež byl vytvořen pomocí toolboxu SimHydraulics.

6. Řídicí systém

Pro řízení hydraulické platformy je použito PLC od výrobce Siemens z řady Simatic. PLC komunikuje prostřednictvím sběrnice Profibus DP se vzdálenou periferií ET200S, ke které jsou připojeny signály hydraulické soustavy. Dále PLC komunikuje se zařízením Simocode, jež řídí hlavní čerpadlo, rovněž prostřednictvím sběrnice Profibus DP. PLC je prostřednictvím sběrnice Ethernet (využívající protokol TCP/IP) spojeno s PC, na kterém běží SCADA systém WinCC. Blokové schéma znázorňující propojení jednotlivých zařízení je znázorněno na obr. 73.

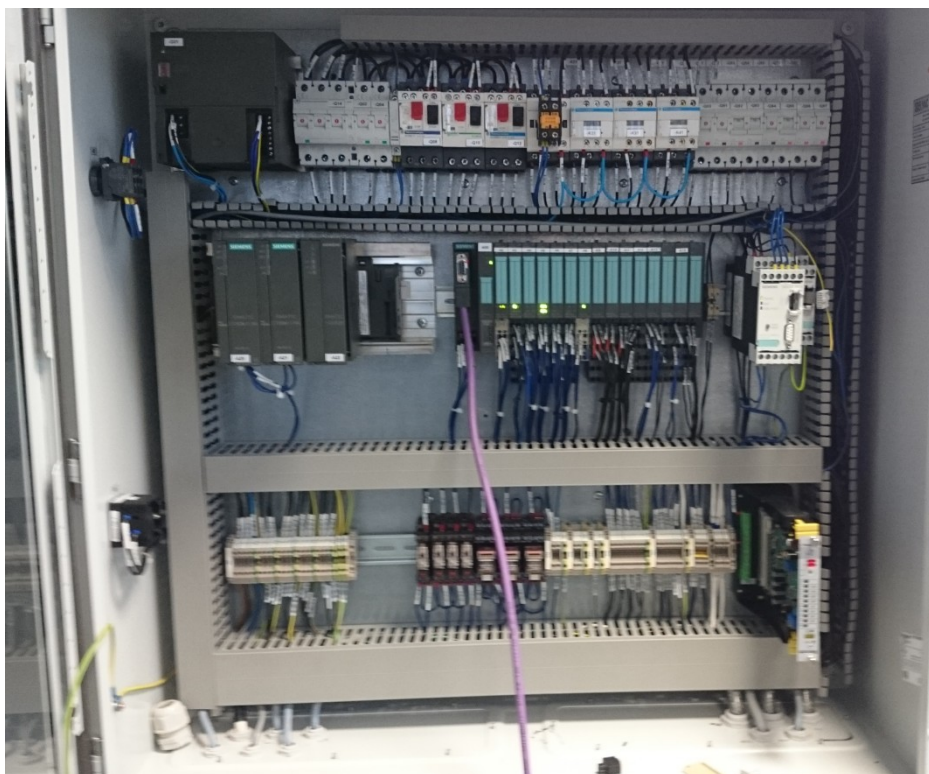


Obr. 73: Blokové schéma řídicího systému. [16] [17] [18] [19] [20]



Obr. 74: HW konfigurace řídicího systému.

Na obr. 75 je viděl pohled na vnitřní uspořádání rozvaděče, jež slouží pro řízení a napájení reálné hydraulické soustavy. CPU se nachází mimo tento rozvaděč.



Obr. 75: Pohled na vnitřní uspořádání rozvaděče.

6.1 Vzdálená periferie ET200S

Vzhledem k tomu, že se jedná o distribuovaný řídicí systém, je pro řízení použita vzdálená periferie. Tato jednotka je umístěna v blízkosti dané technologie, což značně redukuje kabeláž, jež by byla nutná pro použití centralizovaného řídicího systému. Pro řízení soustavy hydraulických válců je použita jen jedna vzdálená periferie, jelikož se jedná o poměrně malý, technologicky uzavřený celek. V praxi se však většinou využívá řešení, kdy každý technologický celek řídí jedna vzdálená periferie a ty jsou propojeny mezi sebou a s centrální procesorovou jednotkou prostřednictvím některé z průmyslových sběrnic (např. Profibus, Profinet...)

Vzdálená periferie je modulární, tudíž se skládá z karet, jež je možné přidávat a ubírat dle potřeby. Pro vzdálenou periferii ET200S existuje mnoho typů karet. Základní dělení je na analogové, digitální a speciální. Další dělení je na vstupní a výstupní.

HW konfigurace ET200S použité v reálné soustavě je znázorněna v tab. 28.

Tab. 28: HW konfigurace vzdálené periferie ET200S.

Číslo slotu	Typ modulu	Objednávací číslo	Vstupní adresy I	Výstupní adresy Q	Diagnostická adresa
1	PM-E DC24/48V/ AC24/230V	6ES7 138-4CB10-0AB0			16378*
2	4DI DC24V ST	6ES7 131-4BD01-0AA0	0.0...0.3		
3	4DI DC24V ST	6ES7 131-4BD01-0AA0	1.0...1.3		
4	4DI DC24V ST	6ES7 131-4BD01-0AA0	2.0...2.3		
5	4DO DC24V/0,5A ST	6ES7 132-4BD02-0AA0		0.0...0.3	
6	4DO DC24V/0,5A ST	6ES7 132-4BD02-0AA0		1.0...1.3	
7	PM-E DC24..48V	6ES7 138-4CA50-0AB0			16377*
8	2AI I 2/4WIRE HF	6ES7 134-4MB02-0AB0	100...103		
9	2AI I 2/4WIRE HF	6ES7 134-4MB02-0AB0	104...107		
10	2AI I 2/4WIRE HF	6ES7 134-4MB00-0AB0	108...111		
11	2AI I 4WIRE ST	6ES7 134-4GB11-0AB0	112...115		
12	2AI U HF	6ES7 134-4LB02-0AB0	116...119		
13	2AO I ST	6ES7 135-4GB01-0AB0		100...103	
14	2AO U HF	6ES7 135-4LB02-0AB0		104...107	
15	2AI I 4WIRE HS	6ES7 134-4GB62-0AB0		120...123	

7. Řídicí program

Řídicí program pro řízení hydraulické soustavy byl napsán v prostředí STEP7 V5.5 SP4. Program byl napsán s využitím standardních programovacích jazyků FBD, LAD a STL, jež jsou obsaženy ve všech verzích prostředí STEP7.

7.1 Programovací standardy firmy Ingeteam a.s.

Firma Ingeteam a.s. má vyvinuty své programové standardy, jež jsou v řídicím programu využity. Jedná se především o funkční bloky, jež jsou určeny pro řízení konkrétního zařízení, či pro zpracování měření. Seznam funkčních bloků, vytvořených firmou Ingeteam a.s., jež byly použity při tvorbě řídicího programu, je vidět v tab. 29. Tyto bloky obsahují další standardizované funkční bloky a funkce, jež jsou nezbytné pro jejich správnou činnost. Pomocné bloky jsou znázorněny v tab. 30.

Tab. 29: FB vyvinuté firmou Ingeteam a.s. použité v řídicím programu hydraulické soustavy.

Název	Symbolický název	Popis
FB210	DgMeas.FB	Zpracování digitálního měření
FB211	AnMeas.FB	Zpracování analogového měření
FB230	DrvOnOff.FB	Řízení motoru prostřednictvím stykače - jeden směr otáčení
FB257	SubVlv.FB	Řízení dvoucívkového ventilu
FB260	SubVlvPropFdb.FB	Řízení proporcionálního ventilu se zpětnou vazbou
FB217	PID.FB	Blok PID regulátoru

Tab. 30: Pomocné bloky vyvinuté firmou Ingeteam a.s. použité v řídicím programu hydraulické soustavy.

Název	Symbolický název	Popis
FB100	DevMode.FB	Univerzální operační módy
FB102	InLckToHMI.FB	Pomocné operace s InterLocky
FB103	InLck32ToHMI.FB	Pomocné operace s 32-bitovými InterLocky
FB106	CyclePeriod.FB	Výpočet periody cyklu PLC ve vteřinách
FB107	WorkHours.FB	Čítač pracovních hodin
FB108	Ramp.FB	Generátor rampy
FC100	GenBits.FC	Generování bitů (log. 1, log. 0, start PLC...)
FC112	Linear.FC	Lineární interpolace
FC115	CopyCmd.FC	Pomocné operace zpracování příkazů
FC116	FltStsInvidHmiAck.FC	Pomocné operace zpracování poruch
FC118	HmiFltAckToGenAck.FC	Pomocné operace zpracování poruch
FC130	SpLim.FC	Limitace žádané hodnoty

Program je rozdělen do dvou skupin. První skupina obsahuje dle technologického rozdělení z 2. kapitoly prvky z bloku hydraulická stanice. Druhá skupina obsahuje prvky z bloku řídicí hydraulické prvky a z bloku soustava hydraulických válců. Samostatná skupina pro blok soustavy hydraulický válců nebyla vytvořena, jelikož blok obsahuje pouze dva analogové snímače pozice pístu a neobsahuje žádný aktuátor.

7.2 Skupina hydraulické stanice (HS)

Jedná se o funkční blok FB1000. Funkční blok je volán z OB1 s instancí DB1000. Datová oblast funkčního bloku je rozdělena do čtyř hlavních částí. Každá z těchto částí je definovaná prostřednictvím UDT (uživatelský datový typ). Jedná se o uživatelské datové typy, které definují: stavy (Sts), příkazy (Cmd), žádané hodnoty (Sp) a poruchy (Flt).

SP – žádané hodnoty

Prostřednictvím datové oblasti žádaných hodnot (Sp) si operátor prostřednictvím vizualizace nastavuje procesní parametry dané skupiny. Datová oblast žádaných hodnot pro hydraulickou stanici je definována v UDT1000.

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	MainPmpDly	REAL	1.000000e+001	Main pump start delay (s)
+4.0	DlyRdyOp	REAL	3.000000e+000	Time, when press. is OK after pump start (s)
+8.0	Spare8	REAL	1.000000e+000	
+12.0	Spare12	REAL	1.000000e+000	
+16.0	FanOnTmp	REAL	4.800000e+001	Temperature to start fan (°C)
+20.0	FanOffTmp	REAL	4.500000e+001	Temperature to stop fan (°C)
+24.0	Spare24	REAL	1.000000e+000	
+28.0	Spare28	REAL	1.000000e+000	
+32.0	HeatOnTmp	REAL	2.200000e+001	Temperature to start heater (°C)
+36.0	HeatOffTmp	REAL	2.500000e+001	Temperature to stop heater (°C)
+40.0	Spare40	REAL	1.000000e+000	
+44.0	Spare44	REAL	1.000000e+000	
=48.0		END_STRUCT		

Obr. 76: Výpis UDT1000 – žádané hodnoty skupiny hydraulická stanice.

Pro ukázkou je na obr. 76 vidět výpis z UDT1000. Z obrázku jsou patrné jednotlivé žádané hodnoty pro parametrizaci skupiny hydraulická stanice. Jedná se o tyto žádané hodnoty: Zpoždění zapnutí hlavního čerpadla po zapnutí skupiny, zpoždění povolení operací (uvolnění ovládání ventilů), zapínací a vypínací teplota ventilátoru a zapínací a vypínací hodnota ohřevu. Tyto hodnoty může uživatel měnit prostřednictvím vizualizace. V UDT jsou vždy ponechány rezervy pro zjednodušení pozdějšího možného přidávání žádaných hodnot.

Tab. 31: Žádané hodnoty skupiny hydraulická stanice.

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
MainPmpDly	REAL	10s	Zpoždění zapnutí hlavního čerpadla
DlyRdyOp	REAL	3s	Zpoždění povolení operací (uvolnění ovládání ventilů)
FanOnTmp	REAL	48°C	Teplota pro zapnutí ventilátoru (°C)
FanOffTmp	REAL	45°C	Teplota pro vypnutí ventilátoru (°C)
HeatOnTmp	REAL	22°C	Teplota pro zapnutí ohřevu (°C)
HeatOffTmp	REAL	25°C	Teplota pro vypnutí ohřevu (°C)

Cmd - příkazy

Prostřednictvím příkazů (Cmd) uživatel ovládá skupinu hydraulická stanice. Jedná se o proměnné typu bool a uživatel je ovládá prostřednictvím tlačítek ve vizualizaci. Ve skupině hydraulická stanice jsou použity příkazy pro potvrzení poruchy, start hydraulické stanice, zastavení hydraulické stanice, přepnutí do automatického režimu a přepnutí do ručního režimu.

Tab. 32: Příkazy skupiny hydraulická stanice.

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
Ack	BOOL	FALSE	Potvrzení poruchy
Str	BOOL	FALSE	Požadavek na start skupiny
Stp	BOOL	FALSE	Požadavek na zastavení skupiny
Auto	BOOL	FALSE	Automatický režim skupiny
ManHMI	BOOL	FALSE	Ruční režim skupiny

Sts – stavy

Informace o tom, v jakých stavech se skupina hydraulická stanice právě nachází, jsou definovány prostřednictvím UDT1002. V tomto UDT mohou být použity různě datové typy, které popisují stavy skupiny. Tyto informace jsou využity řídicím programem pro automatické řízení hydraulické stanice a zároveň informují operátora prostřednictvím vizualizace, skrze různé indikátory, o aktuálním stavu hydraulické stanice.

Tab. 33: Stavy skupiny hydraulická stanice.

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
Wrn	BOOL	FALSE	Varování
WrnNAck	BOOL	FALSE	Nepotvrzené varování
Flt	BOOL	FALSE	Porucha
FltNAck	BOOL	FALSE	Nepotvrzená porucha
CFlt	BOOL	FALSE	Kritická porucha
IoWrn	BOOL	FALSE	I/O varování
Rdy	BOOL	FALSE	Skupina je připravena
Auto	BOOL	FALSE	Automatický režim skupiny
EnbBtnAuto	BOOL	FALSE	Povolení tlačítka pro volbu automatického režimu
ManHMI	BOOL	FALSE	Ruční režim skupiny
EnbBtnManHMI	BOOL	FALSE	Povolení tl. pro ruční režim
IL_AutoSel	BOOL	FALSE	Interlock pro volbu automatického režimu
IL_ManHMISel	BOOL	FALSE	Interlock volbu ručního režimu
Strg	BOOL	FALSE	Skupina startuje
Rng	BOOL	FALSE	Skupina je v chodu
Stpg	BOOL	FALSE	Skupina zastavuje
Stpd	BOOL	FALSE	Skupina není v chodu
IL_Str	BOOL	FALSE	Interlock pro start skupiny
IL_Run	BOOL	FALSE	Interlock pro chod skupiny
IL_Stp	BOOL	FALSE	Interlock pro zastavení skupiny
EnbBtnStr	BOOL	FALSE	Povolení tlačítka pro start skupiny
EnbBtnStp	BOOL	FALSE	Povolení tlačítka pro zastavení skupiny
LI_Run	BOOL	FALSE	Výpadek interlocku během chodu
RngEnbOp	BOOL	FALSE	Povolení operací (využívá další skupina)

Flt – poruchy

Poruchy skupiny jsou odlišné od poruch jednotlivých prvků skupiny. Oproti poruchám u jednotlivých prvků, je jejich počet výrazně menší. Poruchy skupiny jsou úzce spjaty s interlocky. Poruchy skupiny hydraulická stanice jsou znázorněny v tab. 34.

Tab. 34: Stavy skupiny hydraulická stanice.

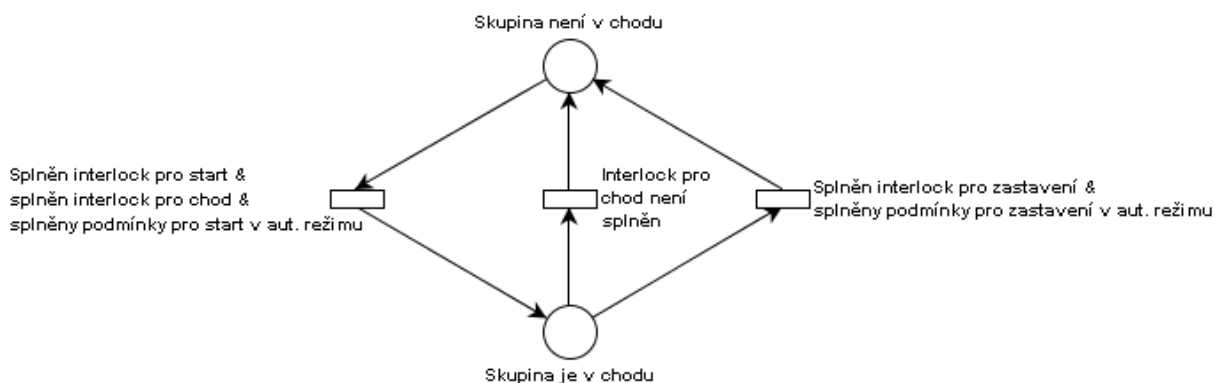
Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
LI_Run	BOOL	FALSE	Ztracení interlocku během chodu skupiny
NoIL_StrInAuto	BOOL	FALSE	Požadavek na start skupiny, ale IL nebyl OK
NoIL_StpInAuto	BOOL	FALSE	Požadavek na zastavení skupiny, ale IL nebyl OK

Interlocky

Jedná se o softwarový, blokovací mechanismus, jenž chrání zařízení před poškozením, případně obsluhu před zraněním. Interlock je prvek, který je nadřazen podmínkám pro automatické řízení. Jsou-li tedy splněny podmínky pro automatické zapnutí daného prvku, ale není splněn interlock (interlock má hodnotu log. 0), k zapnutí prvku nedojde.

Podmínky vstupují do logické funkce, která má návratovou hodnotu bool. Interlock tedy nabývá pouze dvou hodnot. Interlocky jsou využívány jak pro činnost skupiny, tak i pro činnost jednotlivých aktuátorů.

Dle softwarových standardů firmy Ingeteam a.s. jsou využívány tři typy interlocků. Jsou to interlocky pro start zařízení (skupiny), pro chod zařízení a pro vypnutí zařízení. Princip činnosti jednotlivých typů interlocků je patrný z Petriho sítě na obr. 77. Jedná se pouze o zjednodušený diagram určený k demonstraci činnosti interlocků. Kruhy znázorňují stavy skupiny. V jednom okamžiku se skupina může nacházet pouze v jednom ze stavů. Obdelníky představují podmínky pro přechod mezi stavy.



Obr. 77: Petriho síť znázorňující význam jednotlivých interlocků.

Následující tabulka ukazuje seznam interlocků použitých pro řízení skupiny hydraulická stanice. Mezi všemi podmínkami je logická operace AND. V případě, že tedy není splněna jedna z podmínek, není splněn ani interlock.

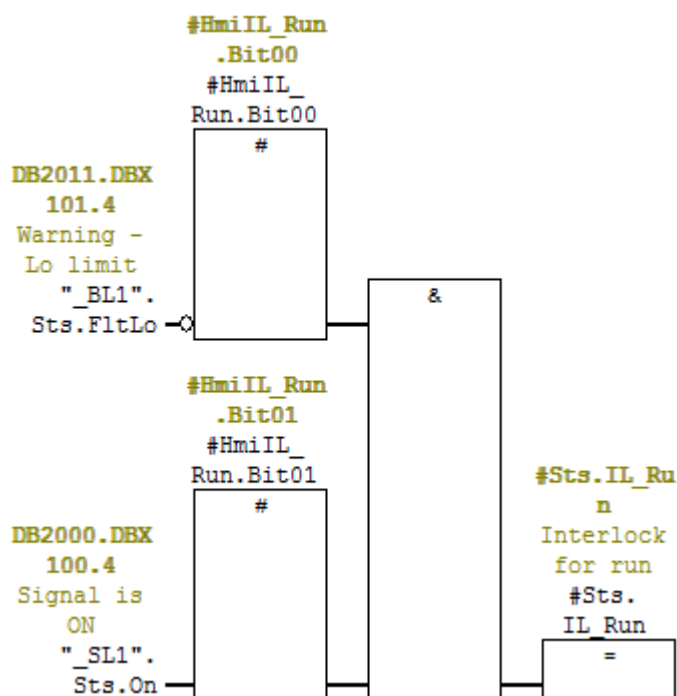
Tab. 35: Interlocky pro start skupiny hydraulická stanice.

Symbolický název	Význam
BL1.Sts.FltLo	Analogový snímač hladiny - není dosaženo spodní alarmové úrovně
BT1.Sts.FltLo	Analogový snímač teploty - není dosaženo spodní alarmové úrovně
BT1.Sts.FltHi	Analogový snímač teploty - není dosaženo horní alarmové úrovně
SL1.Sts.On	Digitální snímač hladiny - hladina OK
ST1.Sts.On	Digitální snímač teploty - teplota OK

Tab. 36: Interlocky pro chod skupiny hydraulická stanice.

Symbolický název	Význam
BL1.Sts.FltLo	Analogový snímač hladiny - není dosaženo spodní alarmové úrovně
SL1.Sts.On	Digitální snímač hladiny - hladina OK

V tab. 35 a v tab. 36 je seznam interlocků pro start a pro chod skupiny hydraulická stanice. Pro zastavení skupiny nejsou žádné podmínky, tudíž bude možné skupiny zastavit kdykoliv. Interlock pro stop skupiny bude tedy vždy nastaven do úrovně log. 1. Na obr. 78 je ukázka implementace interlocků pro chod skupiny hydraulická stanice v prostředí STEP7.



Obr. 78: Ukázka implementace interlocku pro chod skupiny hydraulická stanice.

Automatický a ruční režim

Všechny prvky obsažené ve skupině hydraulická stanice, potažmo v celé hydraulické soustavě, mají možnost volby mezi automatickým a ručním režimem činnosti. Přepínání mezi režimy je možné na úrovni celé skupiny nebo na úrovni jednotlivých prvků (aktuátorů). Přepínání je realizováno výhradně prostřednictvím tlačítek ve vizualizaci.

Automatický režim činnosti znamená, že se aktuátory řídí naprogramovanou logikou v řídicím systému, tedy se zapínají a vypínají na základě splnění nějakých logických funkcí. Například v případě ventilátoru, se ventilátor zapne, pokud je splněn interlock a zároveň jsou splněny podmínky pro start ventilátoru (teplota hydraulického oleje dosáhla určité hodnoty). Pokud se splní podmínky pro vypnutí ventilátoru (teplota oleje klesne pod určitou hodnotu), ventilátor se vypne. Takhle ventilátor funguje v automatickém režimu, pokud má povolen chod a pokud jsou splněny interlocky.

V manuálním režimu se aktuátor řídí dle pokynu operátora, jež zadává příkazy pro řízení aktuátorů prostřednictvím vizualizačního systému. Pro ruční řízení je rovněž nutné splnit interlocky, podmínky pro automatický chod jsou však ignorovány. Pro již zmíněný případ řízení ventilátoru tedy platí, že jsou-li splněny interlocky, operátor pomocí tlačítek ve vizualizaci může zapínat a vypínat ventilátor podle svého uvážení.

Ostatní funkce skupiny hydraulická stanice

Skupina vyhodnocuje, ve kterém stavu činnosti se právě nachází. Pro skupinu jsou definovány čtyři stavy: startuje, je v chodu, zastavuje a není v chodu. Po zapnutí skupiny přejde skupina ze stavu není v chodu, do stavu startuje. Z důvodu omezení proudových nárazů i z technologických důvodů nespínají všechny aktuátory současně. Například po startu skupiny hydraulická stanice se nejdříve sepne cirkulační čerpadlo M2, to promíchá hydraulický olej v nádrži a až poté se sepne hlavní čerpadlo M1, následované sepnutím odlehčovacího ventilu YV1. Poté, co jsou všechny aktuátory v chodu, přejde skupina ze stavu startuje, do stavu v chodu. Obdobné je to při vypínání skupiny. Nejdříve se vypne hlavní čerpadlo M1 a až poté se vypne cirkulační čerpadlo M2.

Dalším úkolem skupiny je vyhodnotit, zdali některý její prvek má poruchu. Skupina přebírá poruchy jejich prvků. Skupina zpracovává příkazy a žádané hodnoty zadávané operátorem prostřednictvím vizualizace a pro potřeby vizualizace rovněž zpracovává stavy a poruchy skupiny.

Ze skupiny jsou volány FB, které řídí prvky skupiny. Seznam volaných FB je uveden v tab. 37. Ve skupině jsou rovněž řešeny interlocky jednotlivých prvků a logika automatického řízení.

Prvky hydraulické stanice

Jednotlivé prvky hydraulické stanice jsou popsány v kapitole 2. V této kapitole je rovněž popsáno rozhraní, jakým jsou jednotlivé prvky připojeny k řídicímu systému, rozsah elektrický signálů, rozsah fyzikálních veličin atd.

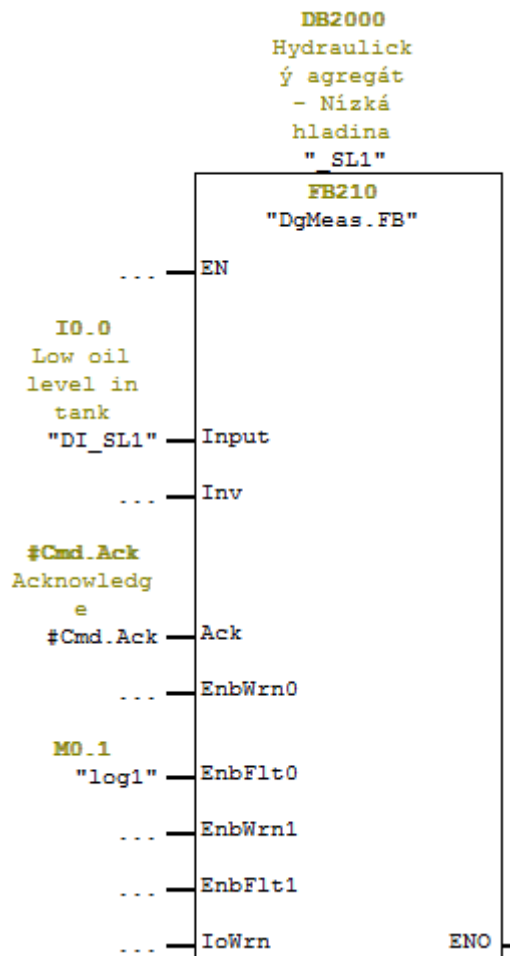
Stejně jako skupiny jsou i jednotlivé prvky definovány prostřednictvím čtyř datových oblastí. Je to oblast žádaných hodnot, oblast stavů, příkazů a poruch. Oblasti jsou definovány prostřednictvím UDT. Každý prvek má odlišná UDT pro tyto datové oblasti. Princip využití datových oblastí je stejný jako u skupin.

V tab. 37 je seznam bloků hydraulické stanice a název bloku, který je využit pro jeho řízení (měření).

Tab. 37: Prvky použité ve skupině hydraulická stanice.

Nadřazená skupina	Symbolický název	Název použitého bloku	Číslo I-DB	Popis
_HS	_SL1	DgMeas	2000	Nízká hladina
_HS	_ST1	DgMeas	2001	Vysoká teplota
_HS	_SP1	DgMeas	2002	Filtr zanesení
_HS	_BT1	AnMeas	2010	Teplota oleje
_HS	_BL1	AnMeas	2011	Hladina oleje
_HS	_M1	DrvOnOff	2020	Hlavní čerpadlo
_HS	_YV1	SubVlv	2025	Odlehčovací ventil hlavního čerpadla
_HS	_M2	DrvOnOff	2030	Cirkulační čerpadlo
_HS	_M3	DrvOnOff	2040	Ventilátor chlazení
_HS	_EH1	DrvOnOff	2050	Topné těleso

Na obr. 79 je vidět ukázka použití bloku DgMeas.FB. Jedná se o blok digitálního měření, jež zpracovává signál z digitálního vstupu. Na obrázku je tento blok použit pro digitální měření hladiny hydraulického oleje. FB je volán s instančním DB2000. Blok má několik vstupů. Na vstupu Input je adresa vstupu, na kterém je přiveden signál ze snímače. Přivedením log. 1 na vstup Inv je možné invertovat logické úrovně pro použití v programu a vizualizaci. Vstupem Ack se potvrzují poruchy. Vstupy EnbWrn a EnbFlt určují, zdali se má vyhodnocovat varování či porucha v dané logické úrovni. Blok je rovněž možné parametrizovat skrze vizualizaci. Je například možné invertovat log. úroveň signálu, případně povolit či zakázat vyhodnocování poruch a varování. Rozhraní statických proměnných bloku digitálního měření je vidět na obr. 80.



Obr. 79: Ukázka použití bloku digitálního měření DgMeas.FB.

Name	Data Type	Address
ReservedForIO	Array [2..99] Of Byte	2.0
Sts	DgMeasSts.UDT	100.0
Flt	DgMeasFlt.UDT	116.0
ReservedForPublic	Array [120..149] Of Byte	120.0
ReservedForParameters	Array [150..199] Of Byte	150.0
HmiInSp	DgMeasSp.UDT	200.0
HmiInCmd	DgMeasCmd.UDT	230.0
HmiOutSts	DgMeasSts.UDT	232.0
HmiOutFlt	DgMeasFlt.UDT	248.0
HmiInFltAck	DgMeasFlt.UDT	252.0
ReservedForHmi	Array [256..299] Of Byte	256.0
FltNAck	DgMeasFlt.UDT	300.0
FltInPEM	DgMeasFlt.UDT	304.0
InputOff_Tof	TOF	308.0
InputOn_Tof	TOF	330.0
EnbWrn0_Tof	TOF	352.0
EnbWrn1_Tof	TOF	374.0
EnbFlt0_Tof	TOF	396.0
EnbFlt1_Tof	TOF	418.0
WrnDly_Tof	TOF	440.0
FltDly_Tof	TOF	462.0
InputPEM	Bool	484.0
InputNEM	Bool	484.1
Sts_OnPEM	Bool	484.2
Sts_OnNEM	Bool	484.3
InputOnMEM	Bool	484.4
OnChngWrnMEM	Bool	484.5
OnChngFltMEM	Bool	484.6
Spare	Array [486..499] Of Byte	486.0

Obr. 80: Ukázka rozhraní statických proměnných bloku DgMeas.FB.

Obdobně fungují i ostatní bloky. Jejich činnosti je však mnohem komplikovanější než činnosti bloku digitálního měření. Rozhraní ostatních bloků je rovněž mnohem obsáhlejší. Z těchto důvodů zde nebudou ostatní bloky podrobněji popisovány.

7.3 Skupina hydraulické ventily a válce (HSV)

Tato skupina je řízena funkčním blokem FB1100, který je volán z OB1 s instancí DB1100. Tato skupina má na starost řízení soustavy tří hydraulických válců pomocí třech hydraulických ventilů. Tuto skupinu je možné řídit až v případě, kdy je v provozu skupina hydraulická stanice. Stejně jako předchozí skupina popsaná v předchozí podkapitole, je i tato skupina definována pomocí čtyř datových oblastí. Význam těchto oblastí je stejný jako u předchozí skupiny.

SP – žádané hodnoty

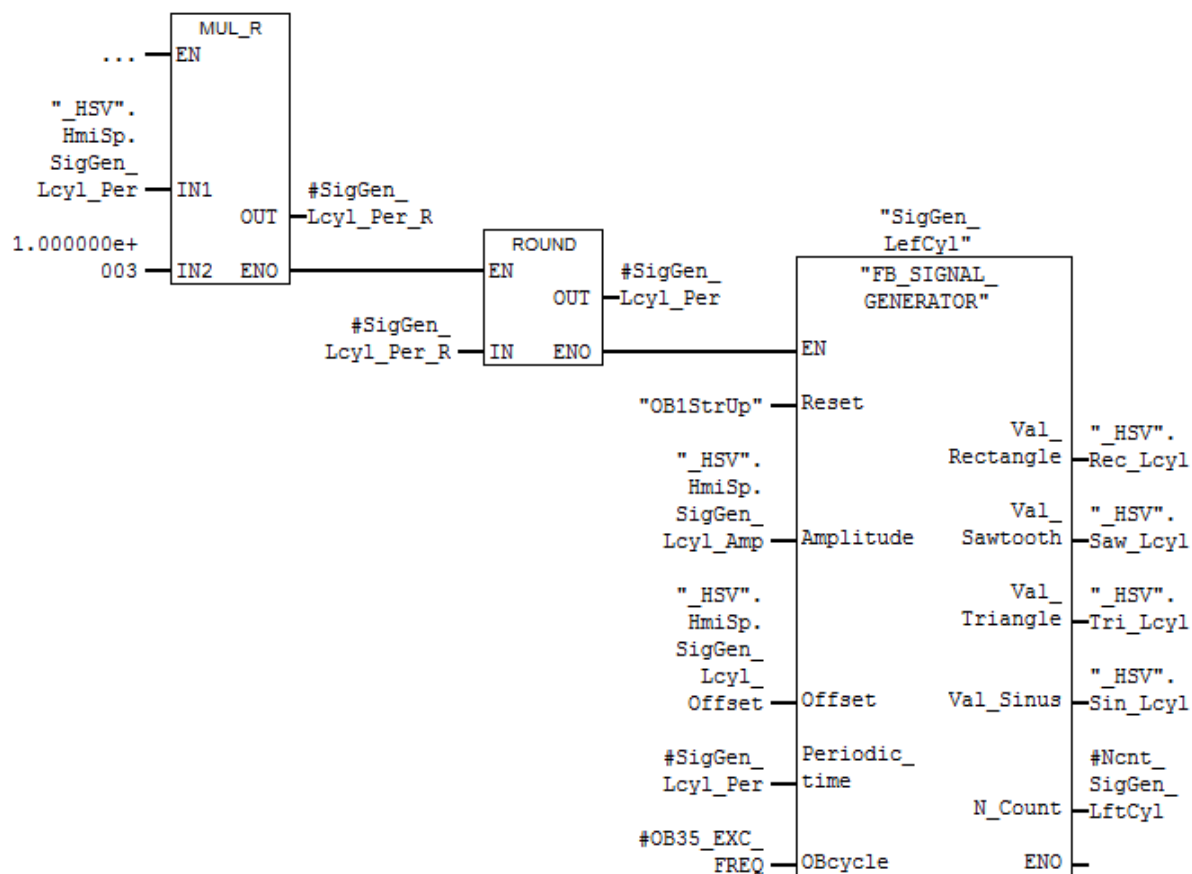
Převážnou část žádaných hodnot tvoří parametry dvou generátorů signálů, jež slouží pro řízení polohy levého a pravého hydraulického válce. Dvě žádané hodnoty jsou určeny pro nastavení požadované polohy pístů hydraulických válců. Píst tedy zůstane na žádané pozici, dokud ji operátor nezmění. Pozice se tedy nebude cyklicky měnit jako v případě řízení generátorem signálů. Přehled žádaných hodnot skupiny HSV je vidět v tab. 38.

Tab. 38: Žádané hodnoty skupiny HSV.

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
PosSp_LeftCyl	REAL	50.0 %	Žádaná pozice levého hydraulického válce
PosSp_RightCyl	REAL	50.0 %	Žádaná pozice levého hydraulického válce
SigGen_Lcyl_Amp	REAL	40.0 %	Generátor signálů pro levý válec - amplituda
SigGen_Lcyl_Offset	REAL	50.0 %	Generátor signálů pro levý válec - offset
SigGen_Lcyl_Per	REAL	5.0 s	Generátor signálů pro levý válec - perioda
SigGen_Rcyl_Amp	REAL	40.0 %	Generátor signálů pro pravý válec - amplituda
SigGen_Rcyl_Offset	REAL	50.0 %	Generátor signálů pro pravý válec - offset
SigGen_Rcyl_Per	REAL	5.0 s	Generátor signálů pro pravý válec - perioda

Žádanou polohu válců tedy zadá operátor ručně nebo je vypočtená generátorem signálů, kterému operátor nastaví parametry. Tento blok není součástí standardů firmy Ingeteam a.s. GS umožňuje generovat signály ve tvaru obdélníku, pily, trojúhelníku a sinusoidu. Operátor si může prostřednictvím vizualizace nastavit amplitudu signálu, offset a periodu signálu.

Na obr. 81 je vidět implementace bloku generátoru signálu. Blok je volán z OB35 (cyklické přerušení). Perioda se zadává ve vteřinách (datový typ real), proto je ji nutné převést na milisekundy. Na vstup OBcycle je přivedena temporary proměnná z rozhraní OB35 #OB35_EXC_FREQ. Tedy i při změně periody volání OB35 zůstane zachována správná činnost generátoru signálu.



Obr. 81: Ukázka implementaci bloku generátoru signálu.

Cmd - příkazy

Význam příkazů a způsob užití je stejný jako u předchozí skupiny. U této skupiny je oproti skupině HS navíc příkaz pro volbu poloautomatického režimu a příkazy pro ovládání tohoto režimu.

Tab. 39: Příkazy skupiny HSV.

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
Ack	BOOL	FALSE	Potvrzení poruchy
Str	BOOL	FALSE	Požadavek na start skupiny
Stp	BOOL	FALSE	Požadavek na zastavení skupiny
Auto	BOOL	FALSE	Automatický režim skupiny
SemiAuto	BOOL	FALSE	Poloautomatický režim skupiny
ManHMI	BOOL	FALSE	Ruční režim skupiny
Up	BOOL	FALSE	Válce nahoru v poloautomatickém režimu
Dwn	BOOL	FALSE	Válce dolů v poloautomatickém režimu

Sts – stavy

Data popisující aktuální stav skupiny. Tyto data jsou využita v logice automatického řízení skupiny a skrze vizualizace informují operátora o aktuálním stavu skupiny. Výpis stavů sekce HSV je uveden v tab. 40.

Tab. 40: Stavy skupiny HSV.

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
Wrn	BOOL	FALSE	Varování
WrnNAck	BOOL	FALSE	Nepotvrzené varování
Flt	BOOL	FALSE	Porucha
FltNAck	BOOL	FALSE	Nepotvrzená porucha
CFlt	BOOL	FALSE	Kritická porucha
IoWrn	BOOL	FALSE	I/O varování
Rdy	BOOL	FALSE	Skupina je připravena k chodu
Auto	BOOL	FALSE	Automatický režim
EnbBtnAuto	BOOL	FALSE	Povolen příkaz pro automatický režim
SemiAuto	BOOL	FALSE	Poloautomatický režim
EnbBtnSemiAuto	BOOL	FALSE	Povolen příkaz pro poloautomatický režim
ManHMI	BOOL	FALSE	Ruční režim
EnbBtnManHMI	BOOL	FALSE	Enable button ManHMI
IL_AutoSel	BOOL	FALSE	Interlock pro volbu automatického režimu
IL_SemiAutoSel	BOOL	FALSE	Interlock pro volbu poloauto. režimu
IL_ManHMISel	BOOL	FALSE	Interlock pro volbu ručního režimu
Strg	BOOL	FALSE	Skupina startuje
Rng	BOOL	FALSE	Skupina je v chodu
Stpg	BOOL	FALSE	Skupina zastavuje
Stpd	BOOL	FALSE	Skupina není v chodu
IL_Str	BOOL	FALSE	Interlock pro start skupiny
IL_Run	BOOL	FALSE	Interlock pro chod skupiny
IL_Stp	BOOL	FALSE	Interlock pro zastavení
EnbBtnStr	BOOL	FALSE	Povolen příkaz pro start skupiny
EnbBtnStp	BOOL	FALSE	Povolen příkaz pro zastavení skupiny
EnbBtnUp	BOOL	FALSE	Povolen příkaz pro pohyb válců nahoru
EnbBtnDwn	BOOL	FALSE	Povolen příkaz pro pohyb válců dolů
LI_Run	BOOL	FALSE	Ztráta interlocku během chodu skupiny
RngEnbOp	BOOL	FALSE	Povolení operací
MovUp_LeftCyl	BOOL	FALSE	Levý válec se pohybuje směrem nahoru
MovDwn_LeftCyl	BOOL	FALSE	Levý válec se pohybuje směrem dolů
MovUp_MidCyl	BOOL	FALSE	Prostřední válec se pohybuje směrem nahoru
MovDwn_MidCyl	BOOL	FALSE	Prostřední válec se pohybuje směrem dolů
MovUp_RightCyl	BOOL	FALSE	Pravý válec se pohybuje směrem nahoru
MovDwn_RightCyl	BOOL	FALSE	Pravý válec se pohybuje směrem dolů

Symbolický název	Datový typ	Počáteční hodnota	Popis
UpPos_LeftCyl	BOOL	FALSE	Levý výlec dosáhl horní pozice
DwnPos_LeftCyl	BOOL	FALSE	Levý výlec dosáhl spodní pozice
MidPos_LeftCyl	BOOL	FALSE	Levý výlec dosáhl středové pozice
UpPos_MidCyl	BOOL	FALSE	Prostřední výlec dosáhl horní pozice
DwnPos_MidCyl	BOOL	FALSE	Prostřední výlec dosáhl spodní pozice
MidPos_MidCyl	BOOL	FALSE	Prostřední výlec dosáhl středové pozice
UpPos_RightCyl	BOOL	FALSE	Pravý výlec dosáhl horní pozice
DwnPos_RightCyl	BOOL	FALSE	Pravý výlec dosáhl spodní pozice
MidPos_RightCyl	BOOL	FALSE	Pravý výlec dosáhl středové pozice
SemiAuto_RngUp	BOOL	FALSE	Pohyb válců nahoru v poloaut. režimu
SemiAuto_RngDwn	BOOL	FALSE	Pohyb válců dolů v poloaut. režimu
TypeSig_Lcyl	INT	0	Typ signálu pro řízení levého válce
TypeSig_Rcyl	INT	0	Typ signálu pro řízení pravého válce

Část stavových proměnných má stejný význam jako u skupiny HS. Jsou to například stavy definující aktuálně zvolený režim skupiny, aktuální pracovní stav, vyhodnocení varování a poruch a interlocky.

Část stavových proměnných je specifická vzhledem k charakteru skupiny. Je to vyhodnocení, jakým směrem se píst konkrétního válce pohybuje a vyhodnocení v jaké pozici se píst válce nachází (horní, spodní či středová pozice). Další stavovou proměnnou je zvolený typ signálu, který řídí pozici pístu hydraulického válce. Ve stavech skupiny je i několik proměnných souvisejících s poloautomatickým režimem skupiny.

Flt – poruchy

Význam i jednotlivé poruchy jsou shodné jako u skupiny HS. Jejich výpis je uveden v tab. 34.

Interlocky

Princip činnosti interlocků je stejný jako u skupiny HS. Hlavním předpokladem pro činnost skupiny HSV je chod skupiny HS. V programu je použita pouze jedna podmínka pro splnění interlocku. Tato podmínka je uplatněna v interlocku pro start i pro chod skupiny HSV. Podmínkou je úroveň log. 1 stavové proměnné sekce HS. Tato proměnná se nastaví do úrovně log. 1 poté, co po nastavení času je hlavní čerpadlo M1 v chodu. Po tomto čase již čerpadlo dodává do systému tlak, na který je nastaveno.

Automatický, poloautomatický a ruční režim

Činnost automatického a ručního režimu je totožná jako u skupiny HS. Skupina HSV obsahuje navíc poloautomatický režim. Tento režim obsahuje dva příkazy. Tyto příkazy jsou realizovány prostřednictvím dvou tlačítek ve vizualizaci. Jedním tlačítkem se všechny písty hydraulických válců nastaví do horní pozice, druhé tlačítko slouží pro nastavení válců do spodní pozice.

Prvky HSV

Přehled všech prvků náležících do skupiny HSV je uveden v tab. 41.

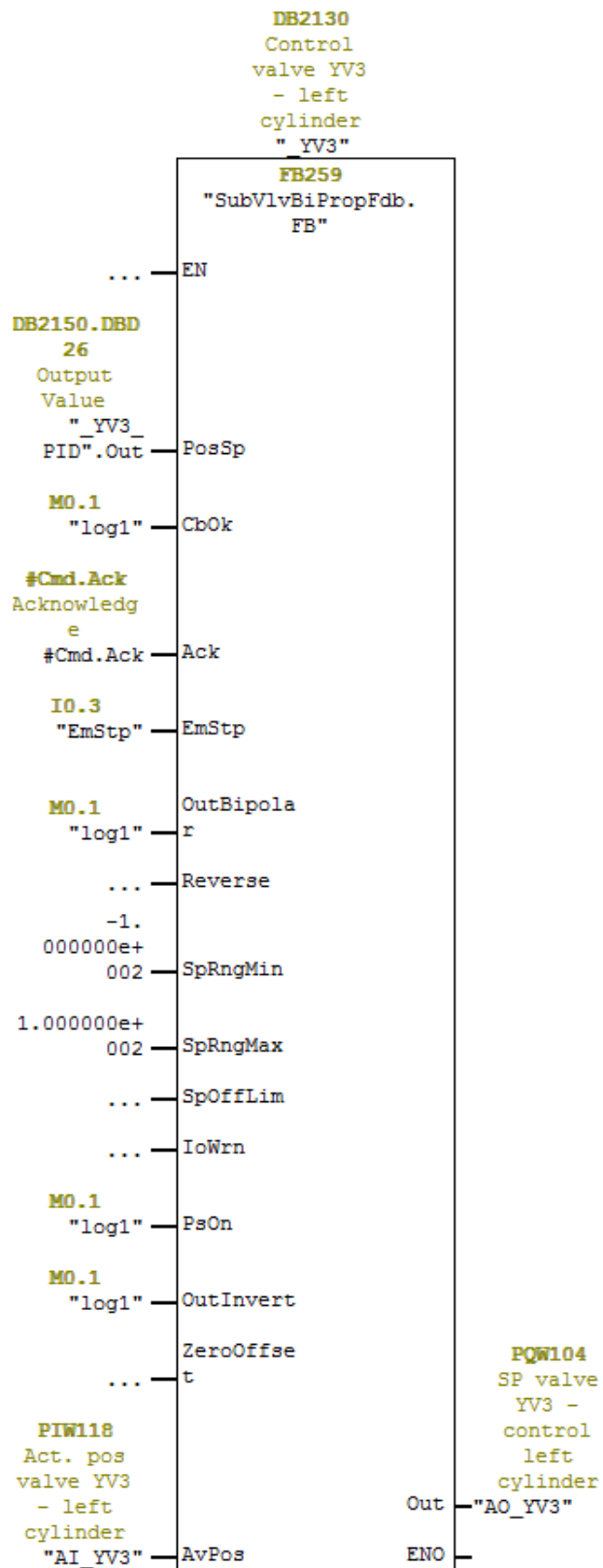
Tab. 41: Přehled prvků skupiny HSV.

Nadřazená skupina	Symbolický název	Název použitého bloku	Číslo I-DB	Popis
_HSV	_BP1	AnMeas.FB	2100	Tlak válec levý nahoru
_HSV	_BP2	AnMeas.FB	2101	Tlak válec levý dolů
_HSV	_BP3	AnMeas.FB	2102	Tlak válec pravý nahoru
_HSV	_BP4	AnMeas.FB	2103	Tlak válec pravý dolů
_HSV	_BP5	AnMeas.FB	2110	Tlak prostřední válec
_HSV	_BF1	AnMeas.FB	2115	Aktuální pozice levého válce
_HSV	_BF2	AnMeas.FB	2116	Aktuální pozice pravého válce
_HSV	_YV4	SubVlv.FB	2120	Ventil YV4
_HSV	_YV3	SubVlvBiPropFdb.FB	2130	Ventil YV3
_HSV	_YV2	SubVlvBiPropFdb.FB	2131	Ventil YV2
_HSV	_YV3_PID	PID.FB	2150	PID regulátor ventilu YV3
_HSV	_YV2_PID	PID.FB	2151	PID regulátor ventilu YV2

Některé bloky ze standardů firmy Ingeteam a.s. bylo nutné pro potřeby řízení hydraulické soustavy upravit. Například funkční blok pro řízení proporcionálního ventilu. Na vstup řídicího systému je přiveden signál měřící aktuální polohu šoupátka ventilu. Původní blok bylo tedy vhodné patřičně pro tuto možnost upravit. Pomocí tohoto signálu je možné vyhodnocovat rozdíl mezi žádanou a skutečnou polohou šoupátka a tím i identifikovat případnou poruchu. Funkční blok rovněž vyhodnocuje přerušení vedení snímače polohy.

Bylo potřeba upravit rozsah měření polohy šoupátka ventilu YV2. Tento ventil má výstupní proudový signál v rozsahu 4-20 mA, který odpovídá otevření ventilu v rozsahu -100 až +100 %. Proudový signál je však pomocí rezistoru převeden na napětí a přiveden na vstupní analogovou napěťovou kartu. Tento signál je však v rozsahu 2-10 V a bylo ho tedy nutné přepočítat do patřičných mezí.

Na obr. 82 je ukázka použití funkčního bloku SubVlvBiPropFdb.FB. Na vstup PosSp (žádaná poloha šoupátka proporcionálního ventilu) je přiveden výstup PID regulátoru (akční zásah). Na vstup AvPos je přivedena aktuální poloha šoupátka ventilu. Vstupy SpRngMin a SpRngMax definují rozsah vstupu PosSp. Vstupem OutBipolar se nastavuje, zdali ventil umožňuje i změnu směru. Vstupem OutInvert se invertuje polarita výstupu bloku. Další vstupy jsou všeobecně použity u většiny bloků. Jedná se o vstup, na který je přiveden signál z nouzového vypínače, signál informující o přítomnosti napájení, signál o stavu jističe ventilu a vstup pro potvrzení poruchy. Výstup bloku je adresován na analogový výstup řídicího systému a ovládá polohu šoupátka proporcionálního ventilu.



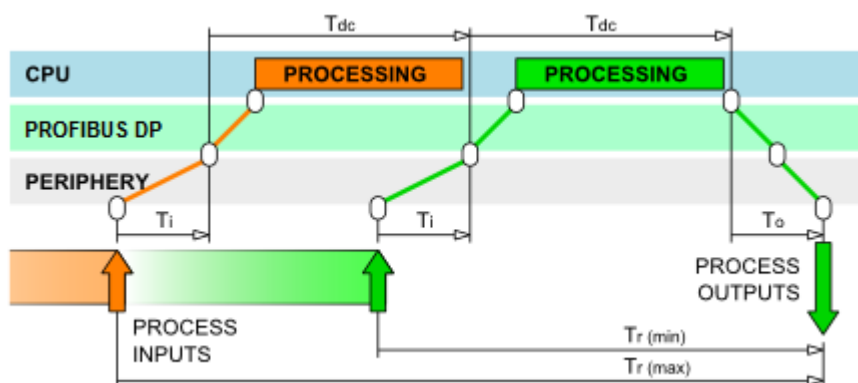
Obr. 82: Ukázka použití bloku SubVlvBiPropFdb.FB.

7.4 Isochronní režim sběrnice Profibus DP

Isochronní režim je časová synchronizace CPU a vzdálených periférií prostřednictvím některé z průmyslových sběrnic, v tomto případě prostřednictvím sběrnice Profibus DP. Díky přesnému časování je tento režim využíván pro řízení rychlejších procesů, například z oblasti řízení pohybu. [33]

Isochronní režim v podstatě optimalizuje komunikaci mezi CPU a vzdálenými perifériemi vhodným časováním jednotlivých dílčích funkcí a vnitřních cyklů [34]. Procesní reakční doba je prodleva, kdy výstup řídicího systému zareaguje na změnu hodnoty vstupu. Bez použití konstantní doby cyklu sběrnice a bez isochronního režimu může být procesní reakční doba velmi malá, ale může trvat i dva cykly řídicího systému. Závisejí to na délkách a na „náhodném“ postavení jednotlivých cyklů procesu. [32]

S konstantní dobou cyklu sběrnice a isochronním režimem mají všechny dané cykly stejnou dobu cyklu. Procesní reakční doba bude tedy u všech těchto cyklů stejná a také bude kratší než v případě bez užití konstantní doby sběrnice a isochronního režimu. [32] Na obr. 83 je znázorněna časová struktura isochronního režimu, ze které jsou patrné výhody isochronního režimu.



Obr. 83: Časová struktura isochronního režimu. [34]

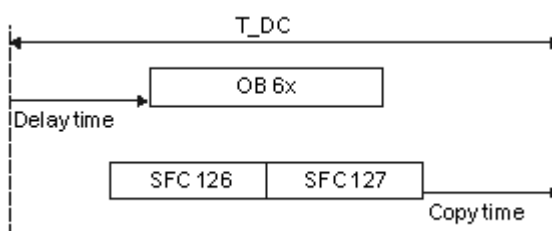
Časování T_i zajišťuje, že všechna potřebná vstupní data jsou připravena k přenosu ještě před zahájením cyklu sběrnice. Čas T_i musí být delší, než je prodleva získání hodnot všech digitálních vstupů a konverze všech analogových vstupů na digitální signál. Čas T_i je možné zadat uživatelsky nebo může být vypočten systémem na základě známé HW konfigurace. Poté proběhne přenos dat prostřednictvím sběrnice Profibus DP do IO řadiče. Data jsou poté vyhodnocena v některém OB synchronního cyklického přerušení (OB61- OB64) a následně se na základě vyhodnocení nastaví požadované hodnoty výstupů těsně před dalším zahájením dalšího cyklu sběrnice. Čas tohoto cyklu T_{dc} je volen uživatelem. Z obr. 83 je patrné, že princip T_o je obdobný principu T_i . Výhodou je, že časování T_i a T_o probíhají současně. Konfigurace konstantní doby cyklu sběrnice je znázorněna na obr. 84. [34]

Obr. 84: Konfigurace konstantní doby cyklu sběrnice.

7.4.1 Programování OB synchronního cyklického přerušení

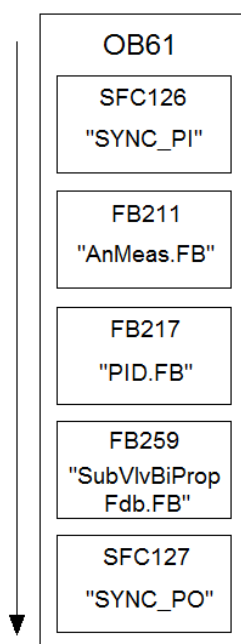
Pro isochronní úsek kódu jsou výhradně určeny OB61 až OB 64. V těchto OB je vhodné používat co nejméně časově náročný kód, jelikož tyto OB jsou volány s vysokou prioritou. Synchronní cyklické přerušení je voláno se zpožděním, které definuje uživatel. Aktualizace obrazu vstupů a výstupů při užití isochronního režimu je prováděna prostřednictvím systémových funkcí SFC126 "SYNC_PI" a SFC127 "SYNC_PO". Při pokusu o přístup k obrazu vstupů a výstupu bez užití systémových funkcí SFC126 a SFC127 nezískáme aktuální procesní data. [32]

Aktualizovat oblast PIP pomocí těchto systémových funkcí je nutné v určitém časovém okně. Časové okno pro možnou výměnu dat pomocí SFC126 a SFC127 je od konce cyklické výměny dat na sběrnici a končí krátce před T_{DC}. Nedojde-li během časového okna k výměně dat, systém na tuto situaci zareaguje chybovým hlášením. Situace je graficky znázorněna na obr. 85. [32]



Obr. 85: Výměna dat v OB synchronního cyklického přerušení. [32]

Vzhledem k tomu, že je nutné, aby kód umístěný v OB synchronního cyklického přerušení byl časově co nejméně náročný, bude obsahovat pouze potřebná SFC pro zpracování vstupů a výstupů, blok pro zpracování analogového signálu (snímač polohy pístu hydraulického válce), PID regulátor a blok pro řízení proporcionálního ventilu. Struktura tohoto OB je znázorněna na obr. 86.



Obr. 86: Struktura OB61 – synchronní cyklické přerušení.

8. Vizualizace

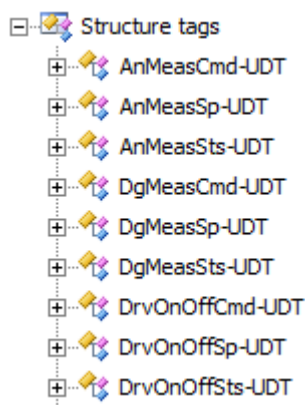
Jako vizualizační systém byl použit produkt firmy Siemens s názvem WinCC ve verzi 7.3. Jedná se o výkonný a v průmyslu velmi využívaný SCADA systém. Wincc běží na PC a s řídicím systémem je propojeno prostřednictvím sběrnice Ethernet využívající protokol TCP/IP. WinCC využívá ke komunikaci s PLC svých interních driverů.

8.1 Tag management

Ve WinCC existuje nástroj Tag management, jež se využívá pro nastavení komunikace mezi WinCC a PLC a zároveň se v něm definují tagy a jejich napojení na fyzickou adresu v PLC. Tag management nabízí při definování tagů několik dalších možností, jako například lineární scaling, omezení maximální a minimální hodnoty, možnost nastavení počáteční hodnoty a náhradní hodnotu v případě nefunkčního spojení.

Stejně jako u řídicího programu byly i ve vizualizaci tagy rozděleny do skupin HS a HSV. Tagů pro vizualizaci hydraulické soustavy je mnoho, a proto by ruční definování tagů bylo nekomfortní a časově velmi náročné. Z tohoto důvodu byl pro automatické generování tagů ve WinCC použit softwarový nástroj vyvinutý firmou Ingeteam a.s.

Pro definování tagů je využito strukturovaných datových typů. Jednotlivé struktury odpovídají datovým oblastem jednotlivých prvků, které jsou popsány v předchozí kapitole. Tagy jsou navázány na proměnné v instančních datových blocích jednotlivých prvků. Na obr. 87 lze vidět seznam některých použitých strukturovaných typů ve WinCC.



Obr. 87: Seznam některých strukturovaných datových typů použitých ve WinCC.

Na obr. 88 je vidět ukázka napojení jednotlivých strukturovaných proměnných datové oblasti Sts prvku AnMeas, jež slouží pro zpracování analogového měření.

	Name	Data type	Connection	Group	Address
1	_BF1_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2115,DB8276
2	_BF2_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2116,DB8276
3	_BL1_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HS	DB2011,DB8276
4	_BP1_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2100,DB8276
5	_BP2_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2101,DB8276
6	_BP3_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2102,DB8276
7	_BP4_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2103,DB8276
8	_BP5_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HSV	DB2110,DB8276
9	_BT1_Sts	AnMeasSts-UDT	SoftPLC	_HS	DB2010,DB8276

Obr. 88: Tagy strukturovaného typu AnMeasSts-UDT.

Adresa uvedená na obr. 88 udává počáteční byte, dle kterého se odpočítávají adresy jednotlivých elementů struktury. Na obr. 32 jsou uvedeny elementy struktury AnMeasSts-UDT. Ve sloupci AS offset je uvedený počet bytů, který se připočítává k počátečním adresám uvedeným na obr. 88. U jednotlivých elementů je dále definován typ, zdali se jedná o externí tag napojený na PLC nebo je to vnitřní proměnná WinCC. Další položkou je datový typ, velikost tagu v bytech a adaptace formátu tagu.

	Name	External	Data type	Length	Format adaptation	AS Length	AS offset
1	B00	<input checked="" type="checkbox"/>	Unsigned 8-bit value	1	ByteToUnsignedByte	1	0
2	B01	<input checked="" type="checkbox"/>	Unsigned 8-bit value	1	ByteToUnsignedByte	1	1
3	B02	<input checked="" type="checkbox"/>	Unsigned 8-bit value	1	ByteToUnsignedByte	1	2
4	B03	<input checked="" type="checkbox"/>	Unsigned 8-bit value	1	ByteToUnsignedByte	1	3
5	B04	<input checked="" type="checkbox"/>	Unsigned 8-bit value	1	ByteToUnsignedByte	1	4
6	ValPct	<input checked="" type="checkbox"/>	Floating-point number 32-bit IEEE 754	4	FloatToFloat	4	6
7	Val	<input checked="" type="checkbox"/>	Floating-point number 32-bit IEEE 754	4	FloatToFloat	4	10
8	Val_Unit	<input type="checkbox"/>	Text reference	4			
9	InVal	<input checked="" type="checkbox"/>	Floating-point number 32-bit IEEE 754	4	FloatToFloat	4	14
10	LpfVal	<input checked="" type="checkbox"/>	Floating-point number 32-bit IEEE 754	4	FloatToFloat	4	18
11	MeasVal	<input checked="" type="checkbox"/>	Floating-point number 32-bit IEEE 754	4	FloatToFloat	4	22

Obr. 89: Elementy struktury AnMeasSts-UDT.

Obdobně jsou definovány všechny ostatní strukturované typy použité ve WinCC pro vizualizaci hydraulické soustavy.

8.2 Tag logging

Tento nástroj slouží ve WinCC pro archivaci hodnot jednotlivých tagů. Data poskytnuta tímto nástrojem jsou poté využívány pro práci s grafy. WinCC v pravidelných intervalech čte procesní data a

ty ukládá do SQL databáze. Při prohlížení grafů s procesními daty naopak WinCC čte data z SQL serveru. Interval ukládání dat je nastavitelný. Nejmenší možná perioda ukládání procesních dat ve WinCC je však 500 ms.

Archivovány jsou především aktuální hodnoty všech analogových a digitálních měření. Dále jsou ukládány data o činnosti jednotlivých aktuátorů. Rovněž jsou archivovány některé veličiny vstupující a vystupující z PID regulátoru, jako jsou žádaná hodnota, aktuální hodnota a velikost akčního zásahu.

Archivovaná data později slouží k analýze chování soustavy prostřednictvím grafů v časové oblasti.

8.3 Alarm logging





Řídicí program vyhodnocuje velké množství poruch, varování a událostí hydraulické soustavy. Některé z těchto událostí se mohou vyskytnout po velmi krátký časový okamžik a následně odeznít. Operátor by tak případnou událost nemusel vůbec registrovat. Případně by událostí mohlo nastat několik současně a v krátkém čase by nebyl schopen určit příčinu.

Obdobně jako tag logging tak i nástroj alarm logging ukládá data do SQL databáze a následně z ní data čte. Nástroj umožňuje v případě, že nastane nějaká událost, uložit množství dat, jež usnadňují pozdější analýzu. Tyto data jsou například: typ (porucha, varování, událost), datum, čas, číslo události, název části technologie, ve které událost nastala, název zařízení, na kterém událost nastala, popis události, čas trvání události a mnoho dalších. Na obr. 90 lze vidět ukázkou výpisu alarmů hydraulické soustavy zobrazenou na samostatné obrazovce ve WinCC.

	Number	Date ▲1	Time ▲2	Type	Status	Point of error	Message text
1	1004	24/04/16	12:04:08 PM	Warning	❗	Hydraulická stanice	Teplota hydraulického oleje je příliš vysoká
2	1005	24/04/16	12:06:00 PM	Alarm	❗	Hydraulická stanice	Teplota hydraulického oleje je příliš vysoká
3	1005	24/04/16	12:07:11 PM	Alarm	❗	Hydraulická stanice	Teplota hydraulického oleje je příliš vysoká
4	1004	24/04/16	12:07:38 PM	Warning	✓	Hydraulická stanice	Teplota hydraulického oleje je příliš vysoká
5	1005	24/04/16	12:07:38 PM	Alarm	✓	Hydraulická stanice	Teplota hydraulického oleje je příliš vysoká

Obr. 90: Ukázka alarmů.

Ve WinCC 7.3 jsou události z hlediska aktuálního stavu rozděleny do čtyř kategorií. Jednotlivé kategorie jsou při posouzení poruchy znázorněny na obr. 91.

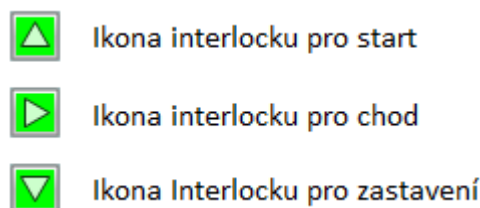
-  **Nastala porucha**
-  **Porucha odezněla**
-  **Porucha přetrvává, je potvrzena operátorem**
-  **Porucha odezněla, je potvrzena systémem**

Obr. 91: Statusy poruch ve WinCC.

8.4 Interlocky

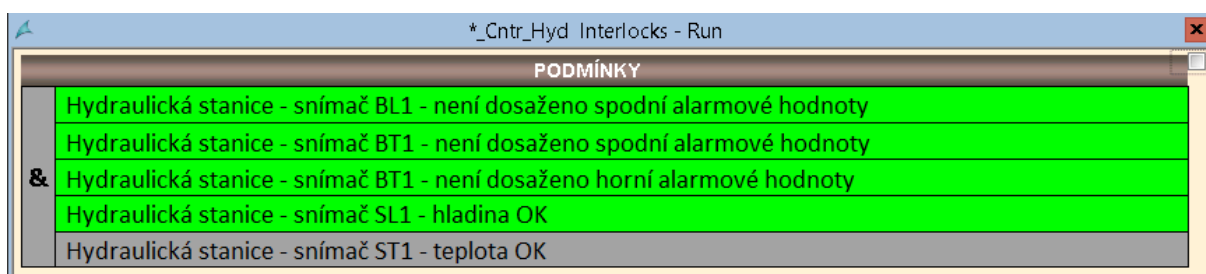
Operátor může prostřednictvím WinCC vidět interlocky pro skupiny i jednotlivé prvky. To umožňuje operátorovi zjistit, zdali je některý prvek blokován, i z jakého důvodu. Operátor může sledovat stav jednotlivých interlocků v reálném čase.

Na obr. 92 jsou vidět ikony jednotlivých interlocků. Horní ikona je ikona interlocku pro start, prostřední pro chod a spodní pro zastavení. Barva ikon se mění v závislosti na tom, zdali je interlock splněn či nikoliv.



Obr. 92: Ikony jednotlivých interlocků.

Po kliknutí myši na ikonu interlocku se objeví vyskakovací okno (PopUp), ve kterém jsou vidět všechny podmínky pro splnění interlocku, kde jejich podbarvení určuje jejich stav. Ukázka interlocku pro start skupiny HS je vidět na obr. 93. Zelená barva znamená, že podmínka je splněna.



Obr. 93: Ukázka interlocku pro start skupiny HS.

8.5 Graphics designer

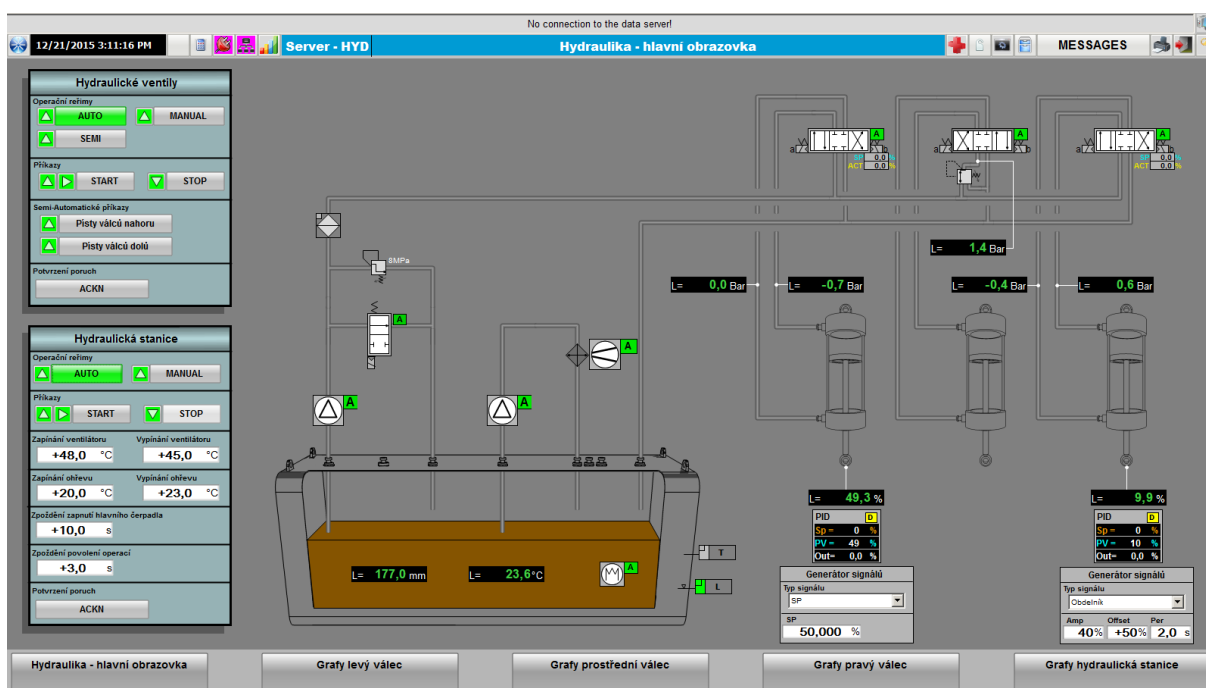
Nástroj Graphics designer slouží k editaci obrazovek a k editaci grafických prvků, jež jsou na obrazovkách rozmístěny. Dnešní systémy mohou být velmi obsáhlé a vizualizovat celý proces pomocí jedné obrazovky by bylo nemožné. Proto se ve většině případů rozdělí technologie do několika menších celků, z nichž každý je zobrazen na jiné obrazovce, popřípadě na několika obrazovkách.

Vizualizace hydraulické soustavy se skládá z jedné hlavní řídicí obrazovky, několika obrazovek s grafy a obrazovky s alarmy. Tyto obrazovky se přepínají tlačítka ve spodní liště obrazovky. Tyto hlavní obrazovky jsou však o úroveň níže, nežli je šablona. Šablona definuje rozměry obrazovek a má v sobě implementovány grafické prvky spodní a horní lišty. Při přepnutí obrazovek tedy dojde vždy jen ke změně prostřední části obrazovky. Seznam hlavních obrazovek je uveden v tab. 42.

Tab. 42: Seznam hlavních obrazovek ve WinCC.

Název obrazovky	Popis obrazovky
201_SelectButtons	Spodní lišta s tlačítky pro volbu obrazovky
202_Hyd	Hlavní obrazovka pro ovládání hyd. soustavy
203_ChrtLCyl	Grafy s daty, jež souvisejí s levým válcem
204_ChrtMidCyl	Grafy s daty, jež souvisejí s prostředním válcem
205_ChrtRCyl	Grafy s daty, jež souvisejí s pravým válcem
206_ChrtHS	Grafy s daty z hydraulické stanice
210_Alarms	Obrazovka s alarmy

Na obr. 94 je vidět hlavní obrazovka 202_HYD. V levé části obrazovky jsou panely sloužící pro ovládání skupin HS a HSV. Jsou zde vidět ikony interlocků, tlačítka pro start a vypnutí skupiny, tlačítka pro přepnutí pracovních režimů, tlačítka pro potvrzení poruch, u skupiny HSV tlačítka pro ovládání skupiny v poloautomatickém režimu a u skupiny HS jsou to žádané hodnoty (Sp) skupiny. Ve spodní části obrázku je vidět obrazovka 201_SelectButtons s tlačítky pro přepnutí obrazovek. V horní části obrazovky je horní lišta definovaná šablonou (nadřazenou obrazovkou).

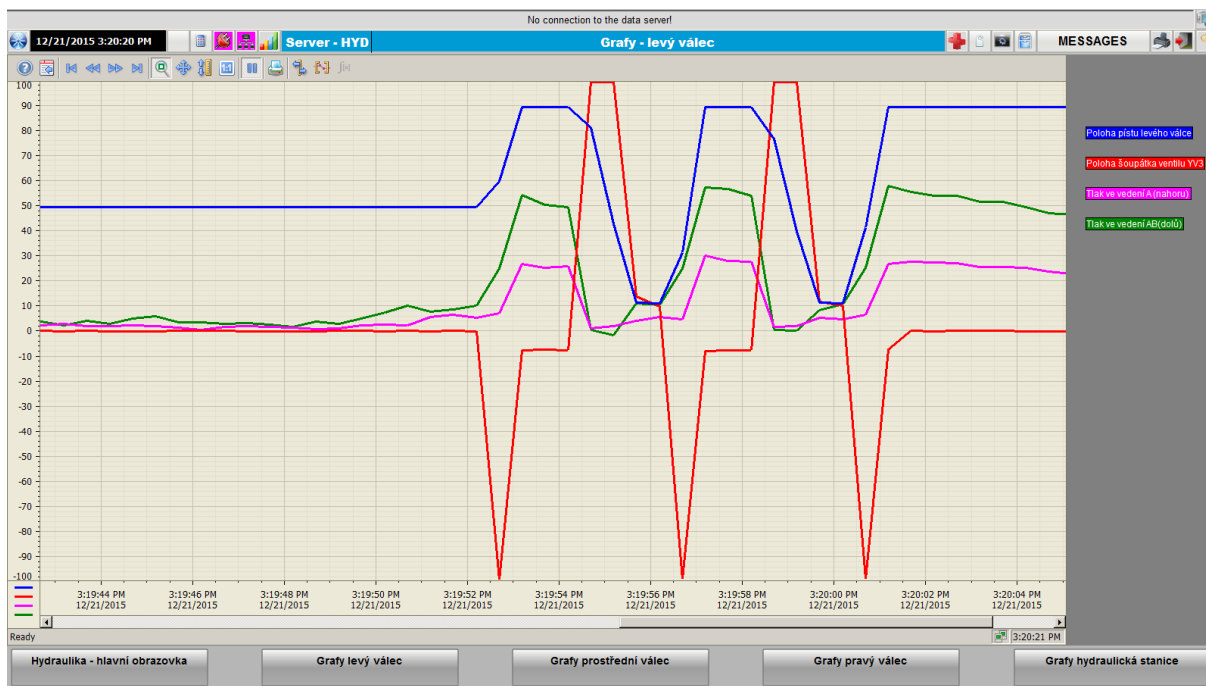


Obr. 94: Hlavní obrazovka 202_HYD pro ovládání hydraulické soustavy.

Z obrazovky je patrné rozmístění jednotlivých komponent hydraulické soustavy i jejich propojení prostřednictvím hydraulického vedení. V pravé spodní části obrazovky jsou vidět dva PID regulátory,

jež regulují polohy pístů krajních hydraulických válců. Pod nimi jsou vidět dva generátory signálů, jejichž výstup vstupuje do vstupu žádané hodnoty PID regulátoru.

Na obr. 95 je vidět obrazovka s grafy levého hydraulického válce. V pravé části obrazovky jsou vidět jednotlivé průběhy, které se v grafu zobrazují. Podbarvení popisu je shodné s barvou čáry v grafu. Z průběhu grafu je patrná 500ms vzorkovací perioda.



Obr. 95: Obrazovka 203_ChrtLCyl s grafy levého hydraulického válce.

V horní části grafu je nástrojová lišta umožňující bližší analýzu grafu. Umožňuje zastavit/spustit graf, posouvat graf v čase, přiblížit/oddálit určitou oblast, změnit měřítko, změnit rozsah časové osy i osy s hodnotami, zjistit aktuální hodnoty v konkrétním čase a spoustu dalších operací.

Faceplate

Faceplate je grafický standardizovaný objekt. Ve WinCC se typ faceplate ukládá s příponou fpt, na rozdíl od běžných obrazovek s příponou pdl. V nástroji graphics designer se vytvoří objekt typu faceplate a do jednotlivých obrazovek se poté vkládají jeho instance. Tím se například dosáhne úspory času při změnách, protože stačí pozměnit objekt faceplate a tím dojde ke změnám na všech obrazovkách. Navíc je docíleno standardizovaného rozhraní. Tedy například je vytvořen objekt faceplate pro ventil a jeho instance jsou vloženy do všech obrazovek, kde se ventil nachází.

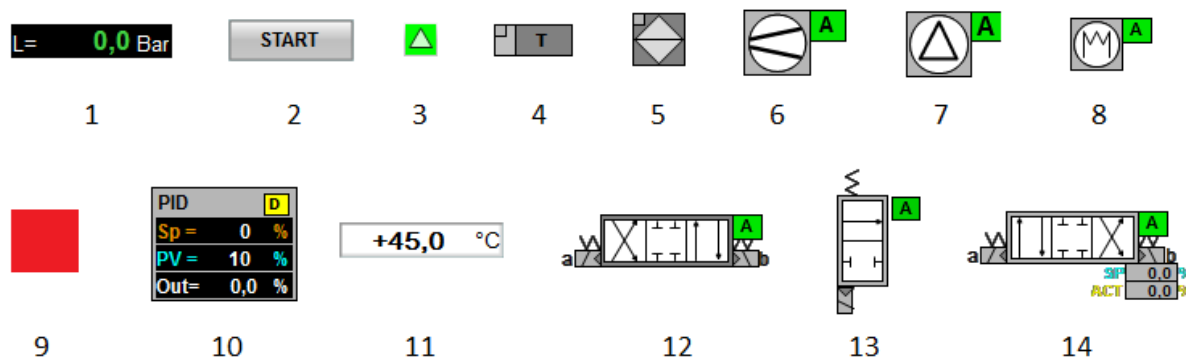
Faceplate má dva typy vlastností a událostí. První typ je definován v objektu faceplate. Tyto vlastnosti a události mohou být změněny pouze přímo v objektu, nelze je měnit v jednotlivých instancích. U druhého typu se konfiguruje vlastnosti a události v jednotlivých instancích objektu.

Tab. 43 ukazuje přehled všech použitých objektů faceplate ve vizualizaci.

Tab. 43: Seznam použitých objektů faceplate ve WinCC.

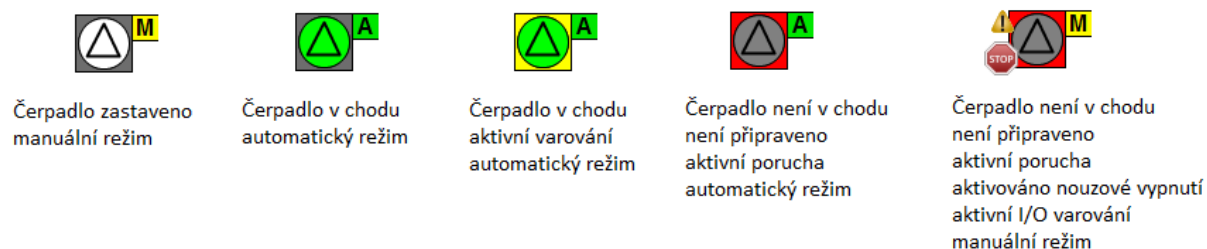
Označení	Název objektu faceplate	Popis
1	AnMeas	Objekt analogového měření
2	Button	Objekt tlačítka
3	ButtonInlck	Objekt tlačítka interlocku
4	DgMeas	Objekt digitálního měření
5	DgMeasFilter	Objekt digitálního měření - vzhled filtru
6	DrvOnOff_Fan	Objekt pohonu - ventilátor
7	DrvOnOff_Heater	Objekt pohonu - ohřev
8	DrvOnOff_Pump	Objekt pohonu - čerpadlo
9	Group	Objekt skupiny
10	PID	Objekt PID regulátoru
11	SP	Objekt pro nastavení žádaných hodnot
12	SubVlv_Hyd	Objekt dvoucívkového ventilu
13	SubVlv_Hyd_1Coil_RhtOpn V	Objekt jednocívkového ventilu
14	SubVlvProp_Hyd	Objekt proporcionálního ventilu

Na obr. 96 jsou vidět objekty typu faceplate použité ve vizualizaci. Číslo označení z tab. 43 odpovídá číslu pod jednotlivými objekty.



Obr. 96: Ukázka použitých faceplate objektů ve WinCC.

Faceplate objekty mění svou podobu (barvu, ikony...) podle toho, v jakém stavu je prvek napojený na faceplate objekt. Na obr. 97 je vidět ukázka, jak se mění vzhled faceplate objektu čerpadla v závislosti na aktuálním stavu čerpadla. Obdobně se mění i ostatní faceplate objekty. Na obrázku jsou vyobrazeny jen nejvýznamnější stavy čerpadla. Objekt obsahuje i několik dynamicky se měnících vlastností, například blikání barevného podkladu při zapínání nebo vypínání čerpadla.



Obr. 97: Faceplate objekt čerpadla a změna jeho vzhledu v závislosti na aktuálním stavu čerpadla.

Všechny použité objekty faceplate mají mnoho vlastností, jež se dynamicky mění v závislosti na aktuálním stavu prvku, který představují. Na obr. 98 je ukázka vlastností faceplate objektu pro digitální měření. Jedná se o vlastnosti, jež jsou konfigurovatelné pro každou instanci objektu. Větší část vlastností se mění dynamicky, což je označeno symbolem blesku (dynamic dialog). Ve WinCC existují i jiné způsoby dynamické změny vlastností než je použití možnosti dynamic dialog (direct connection, tag connection, C-action a VBS-action). Většina prvků má pouze jednu událost. Tou událostí ji kliknutí myši na objekt, čímž se vyvolá skript napsaný v jazyce C-script, který otevře vyskakovací okno (PopUp), kde je blíže definován daný prvek.

Attribute	Static	Dynamic
TagName	_ST1	💡
Wrn_000	No	⚡
WrnNotAck_001	No	⚡
Flt_002	No	⚡
FltNotAck_003	No	⚡
On_004	No	⚡
Frc0_005	No	⚡
Frc1_006	No	⚡
Text	T	💡
InRaw_031	No	⚡
IoWrn_010	No	⚡

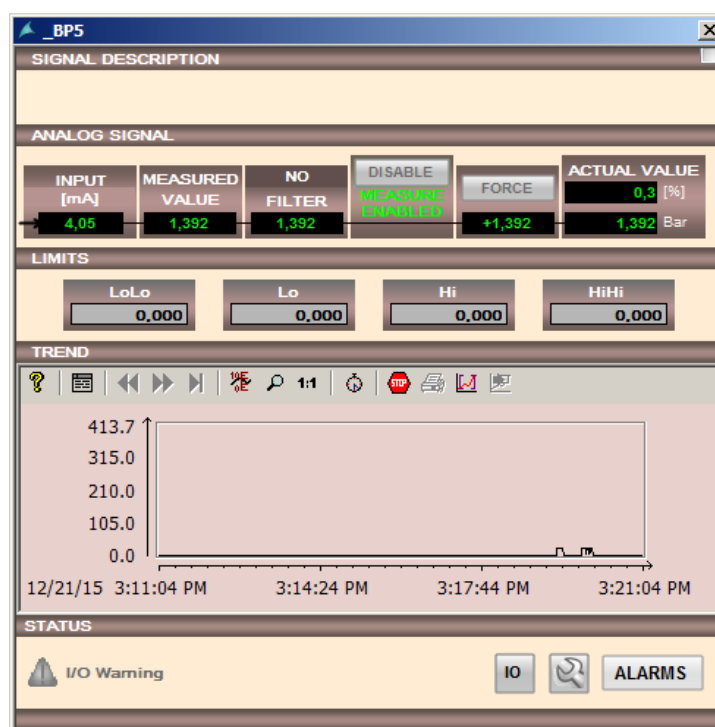
Obr. 98: Vlastnosti instance faceplate objektu DgMeas.

PopUp obrazovky

Všechny faceplate objekty uvedené v tab. 43 (až na objekty Group, SP a Button) mají k dispozici přidruženou vyskakovací obrazovku. Obrazovka se vyvolá po kliknutí myši na faceplate objekt. V jednotlivých instancích faceplate objekt je vlastnost z názvem TagName. Do této vlastnosti se vepíše název příslušného prvku (prvek je definován v nástroji tag management). Hodnota vlastnosti TagName se předá pomocí skriptu vyskakovací obrazovce, která s hodnotou dále pracuje. Tato hodnota se zpracuje pomocí skriptu a pomocí různých grafických objektů se zobrazí stavy (případně

poruchy) daného prvku. To platí i pro tlačítka, jimiž se realizují příkazy a pro faceplate objekty SP, jimiž se mění žádané hodnoty daného prvku.

Na obr. 99 je vidět vyskakovací obrazovka pro analogové měření. V horní části obrazovky, zleva je vidět hodnota elektrického signálu, hodnota měřené fyzikální veličiny, filtrovaná hodnota, příkaz pro povolení měření, příkaz pro nasimulování měřené hodnoty a výsledná měřená hodnota ve fyzikálních jednotkách a v procentech. V prostřední části obrazovky jsou limity pro varování a pro alarm. Pod nimi se nachází graf s měřenou hodnotou a pod ním některé další statusy.



Obr. 99: PopUp (vyskakovací obrazovka) objektu analogového měření.

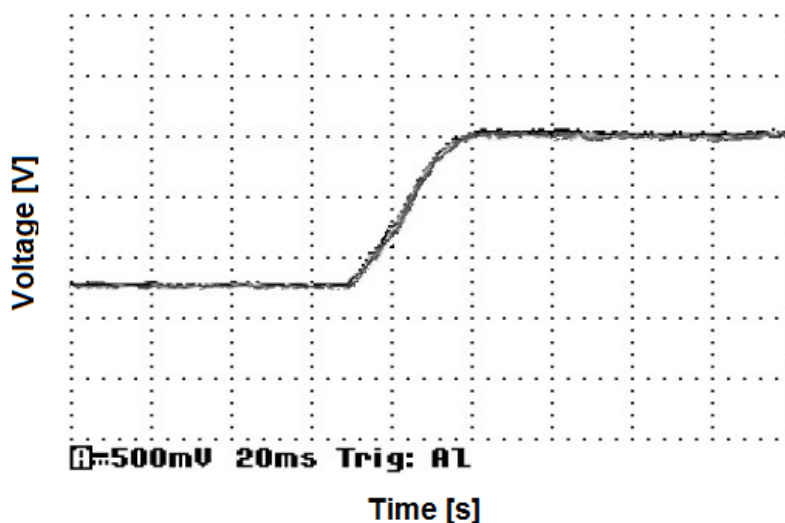
9. Zhodnocení výsledků

9.1 Porovnání ventilu s integrovanou řídicí elektronikou a ventilu s řídicí elektronikou na kartě Rexroth.

Mechanické parametry obou ventilů jsou totožné. Tyto ventily se liší způsobem řízení polohy šoupátka. První ventil je řízen řídicí elektronikou, jež je integrovaná přímo na ventilu. Druhý ventil je řízen prostřednictvím regulační karty Rexroth, která je umístěna v rozvaděči. Regulační karta Rexroth nabízí oproti elektronice integrované na ventilu několik možností navíc. Jedná se především o možnost nastavení pěti ramp. Nicméně nevýhodou je, že karta zabírá místo v rozvaděči. Podrobnější popis proporcionálních ventilů je uveden v kapitole 2.

Předmětem porovnávání bude porovnat přechodové charakteristiky jednotlivých ventilů a vyhodnotit případné odlišnosti. Na vstup ventilu bude přiveden jednotkový skok odpovídající 100% otevření ventilu a bude měřena aktuální poloha šoupátka u obou ventilů.

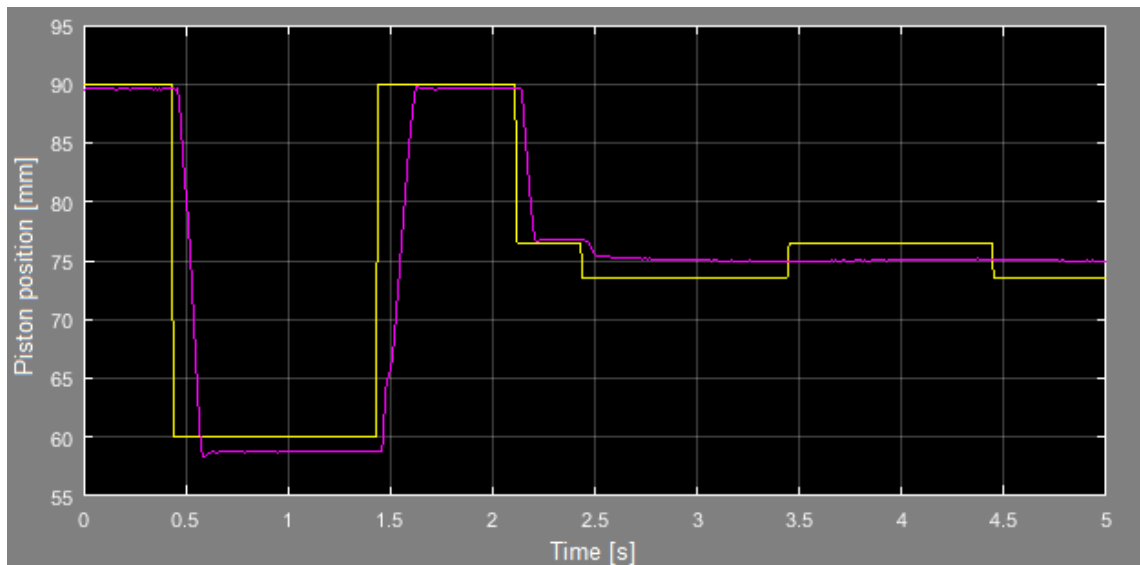
Dle katalogového listu výrobce by doba ustálení při těchto podmínkách měla být okolo 30 ms. Vzhledem k době cyklu PLC, které se v tomto konkrétním případě pohybuje kolem hodnoty 15 ms, bylo nutné přechodovou charakteristiku měřit pomocí jiných prostředků než je PLC, například pomocí osciloskopu. Porovnání přechodových charakteristik obou ventilů je uvedeno na obr. 100. Z obrázku téměř nelze rozeznat, že se jedná o dvě přechodové charakteristiky, proto lze usoudit, že kvalita regulace polohy šoupátka je u obou typů řízení ventilů totožná.



Obr. 100: Porovnání přechodových charakteristik ventilů s různými typy řízení.

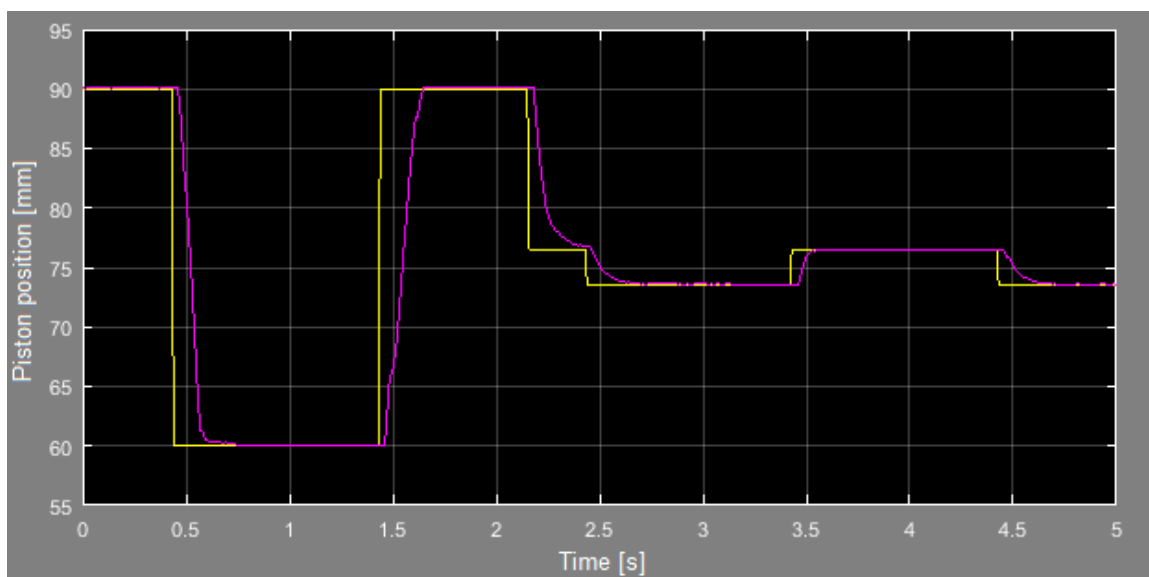
9.2 Posouzení vlivu linearizace statické charakteristiky

Blok pro linearizaci soustavy je nutné aplikovat na reálnou soustavu a ověřit funkčnost a přínos linearizace. Za výstup regulátoru byl připojen funkční blok, jehož realizace je uvedena v příloze C. Vliv linearizace bude porovnáván při obdélníkovém řídicím signálu. Na obr. 101 je vidět průběh regulačního děje bez použití FB pro linearizaci. Při obdélníkovém řídicím signálu s amplitudou 15 mm je patrná poměrně významná odchylka žádané a regulované veličiny v ustáleném stavu. Při obdélníkovém řídicím signálu s amplitudou 1,5 mm se dokonce průběh regulované veličiny neměnil vůbec. Toto chování je způsobeno nelinearitou statické charakteristiky proporcionálního ventilu.



Obr. 101: Průběh regulačního děje reálné soustavy bez použití FB pro linearizaci.

Na obr. 102 je vidět průběh regulačního děje se zařazením FB pro linearizaci za blok regulátoru. Při pohledu na graf je zlepšení zcela patrné. Odchylka v ustáleném stavu byla téměř nulová.



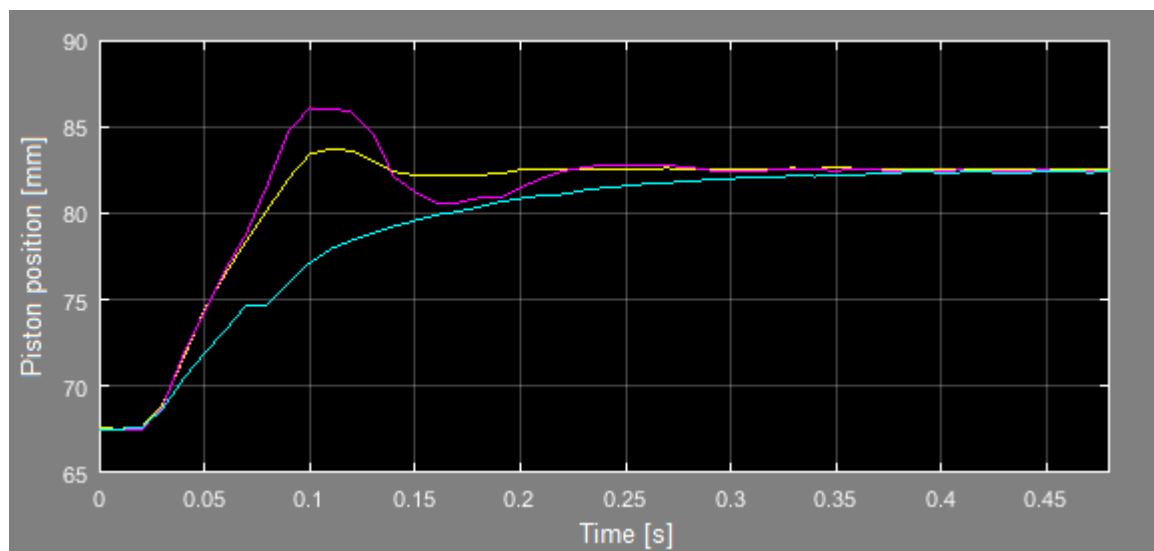
Obr. 102: Průběh regulačního děje reálné soustavy s použitím FB pro linearizaci.

Oba tyto průběhy byly měřeny při použití regulátoru typu P se zesílením 10. Jak lze předpokládat, tak i dle kvalitativního kritéria ITAE byl vyhodnocen značný rozdíl mezi regulací s linearizačním FB a bez něho. Hodnota ITAE bez linearizačního FB činila 22,21 a s linearizačním FB 5,52.

9.3 Porovnání regulátorů při řízení reálné soustavy




Jednotlivé regulátory, jejichž parametry jsou odvozeny v kapitole 5, je nutné otestovat na reálné soustavě. Řídicí signálem byl skok v čase 0 z hodnoty 67,5 mm na hodnotu 82,5 mm. Průběhy byly změřeny pomocí specializovaného software pro měření dat z PLC a následně importovány do Simulinku do bloku Signal Builder, kde byla tyto data analyzována.

Naměřené průběhy na reálné soustavě je vidět na obr. 103. Žlutá křivka znázorňuje přechodový děj při použití PD regulátoru, fialová křivka při použití P regulátoru s povoleným překmitem a křivka modrá při použití P regulátoru bez povoleného překmitu. Při pohledu na graf je zcela patrné, že nejlepší kvalitu regulace vykazuje PD regulátor.



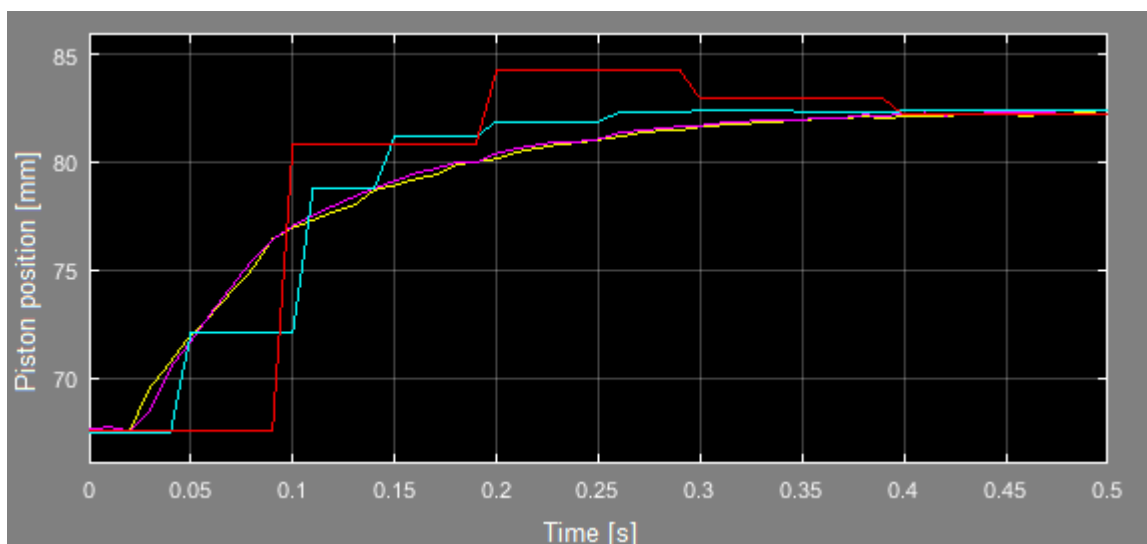
Obr. 103: Porovnání regulátorů na reálné soustavě.

Tab. 44: Porovnání regulátorů na reálné soustavě.

Typ regulátoru	Barva křivky	Překmit [%]	P	D	Doba ustálení [ms]	ITAE
P		24	20	-	210	0,06324
PD		8	15,45	0,13	131	0,037
P		0	8,45	-	306	0,1267

9.4 Porovnání regulace reálné hydraulické soustavy při různých dobách cyklu OB35





Pro řízení reálné soustavy byl zvolen P regulátor se zesílením 8,45, jež při 10ms době cyklu OB35 nevykazoval žádný překmit, jak je patrné z obr. 103. Na obr. 104 je vidět porovnání regulace s různými dobami cyklu OB 35. Byly zvoleny hodnoty: 2 ms, 10 ms, 50 ms a 100 ms. Z grafu na obr. 104 je patrné, že rozdíl mezi dobou cyklu 2 ms a 10 ms není výrazný rozdíl, proto by bylo v tomto případě vhodné zvolit dobu cyklu 10 ms, jelikož by méně zatížila hlavní smyčku programu OB1. Naopak doba cyklu 100 ms je již příliš velká a vykazuje značný překmit. Překmit je možné omezit snížením zesílení regulátoru, čímž by ovšem došlo ke zpomalení přechodového děje. Další zvyšování doby cyklu OB35 již nemá smysl, jelikož při použití tohoto regulátoru by se zhoršovali vlastnosti regulace, až do doby, kdy by se zpětnovazební smyčka stala nestabilní. Velmi výhodné vlastnosti vykazuje regulace s dobou cyklu 50 ms. Regulace s touto periodou má nejlepší kvalitu dle kritéria ITAE a rovněž nejkratší dobu ustálení.



Obr. 104: Porovnání regulace reálné hydraulické soustavy při různých dobách cyklu OB35.

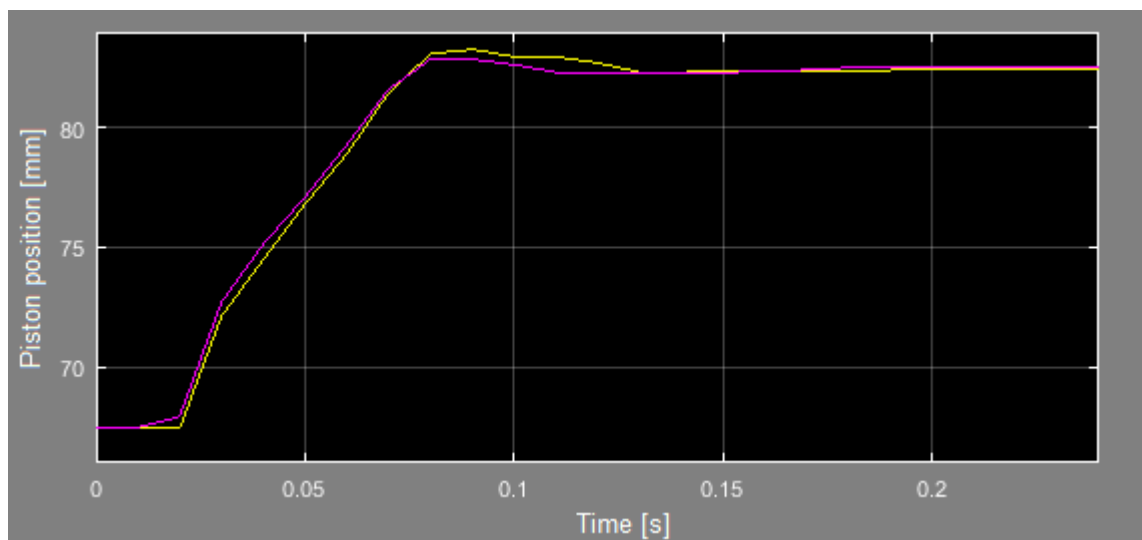
Pro získání potřebných parametrů přechodového děje byly průběhy s dobou cyklu 50 ms a 100 ms aproximovány.

Tab. 45: Porovnání regulace reálné hydraulické soustavy při různých dobách cyklu OB35.

Doba cyklu OB35 [ms]	Barva křivky	Překmit [%]	Doba ustálení [ms]	ITAE
2		0	310	0,1639
10		0	310	0,1544
50		0,5	180	0,0809
100		13	370	0,1399

9.5 Porovnání regulace prostřednictvím OB35 a pomocí isochronního režimu sběrnice Profibus DP (OB61)

Pro porovnání byl zvolen P regulátor se zesílením 10. Perioda volání OB35 byla nastavena na 5 ms. Konstantní doba cyklu sběrnice Profibus DP byla rovněž nastavena na 5 ms. Z grafu na obr. 105 je patrné, že regulace pomocí OB35 (žlutá křivka), vykazuje horší kvalitu regulace, než regulace prostřednictvím isochronního režimu. Nicméně rozdíl není výrazný.



Obr. 105: Porovnání regulace pomocí OB35 a prostřednictvím isochronního režimu sběrnice Profibus DP (OB61).

Tab. 46: Porovnání regulace pomocí OB35 a prostřednictvím isochronního režimu sběrnice Profibus DP (OB61).

Volání regulátoru	Barva křivky	Překmit [%]	Doba ustálení [ms]	ITAE
OB61	—	4	75	0,0181
OB35	—	7	100	0,0208

10. Závěr

Před započtením prací bylo nutné analyzovat hydraulickou soustavu. Soustava byla rozdělena na tři subsystémy. Byla provedena analýza z hlediska činnosti jednotlivých subsystémů a jednotlivých hydraulických prvků. Dále byl rozebrán způsob připojení jednotlivých prvků s řídicím systémem a obecné nároky na činnost řídicího programu. Analýza hydraulické soustavy byla podkladem pro vytvoření modelu soustavy a pro tvorbu řídicího programu.

Pro účely analýzy soustavy, linearizace soustavy a syntézu regulátoru byl vytvořen model hydraulické soustavy. Model byl vytvořen v Simulinku s využitím toolboxu SimHydraulics. Model vzniká propojením hydraulických komponent, jež jsou parametrovány na základě katalogových listů výrobců. Modely některých hydraulických komponent bylo možné vytvořit dle katalogových listů výrobců, nicméně u některých komponent to nebylo možné. Tyto parametry byly získány pomocí optimalizačních úloh z již změřených dat reálné soustavy, což eliminuje možnost tvorby modelu před realizací reálného systému. Některé propojovací hydraulické prvky, jejichž parametry nebyly rovněž známy, byly pro jednoduchost souhrnně nahrazeny hydraulickým odporem. Model byl porovnán s reálnou hydraulickou soustavou a byla ověřena jejich podobnost.

Pro linearizaci soustavy bylo využito Hammersteinova modelu, kdy byl model rozdělen na nelineární statickou a lineární dynamickou část. Nelineární statická charakteristika byla získána z modelu soustavy a linearizace byla provedena její inverzní funkcí, jež se zařadila mezi regulátor a soustavu. Pro získání Hammersteinova modelu byla nutné odvodit přenos lineární dynamické části systému. Přenos byl získán prostřednictvím nástroje Ident z Matlabu, do něhož byla importována data, která byla získána rovněž z modelu soustavy. Následně byl přenos doplněn pro zvýšení přesnosti o setrvačný člen. Přínos linearizace byl ověřen na reálné soustavě. Linearizace měla velký přínos z hlediska přesnosti polohování, kdy výsledná se pohybovala v řádku jednotek setin milimetru.

Pro řízení byl použit konvenční PID regulátor v jeho diskretní podobě. Syntéza regulátoru proběhla pomocí nástroje PID Tuner z Matlabu. Dle charakteru soustavy byly uvažovány varianty regulátoru bez integrační složky. Jako nejrychlejší regulátor s nejvyšší kvalitou regulace se jevil PD regulátor. U mnohých polohovacích úloh existuje požadavek na nulový překmit regulačního děje a i pro tento případ byl navrhnut regulátor, kdy nejvhodnější byl regulátor typu P. Regulátory byly nejdříve ověřeny při řízení modelu, vytvořeném pomocí toolboxu SimHydraulics a poté byly ověřeny i při řízení reálné hydraulické soustavy.

Soustava byla řízena softwarovým PLC WinLC RTX firmy Siemens, ke kterému byla prostřednictvím sběrnice Profibus DP připojena vzdálená periferie ET200S, ke které byly připojeny signály hydraulické soustavy. Řídicí program byl vytvořen v prostředí STEP7 s využitím standardů firmy Ingeteam a.s. Větší část programu byla napsána s využitím jazyků FBD a STL. Některé bloky, jako například linearizační funkce, byly vytvořeny v Matlabu, kde z nich byl pomocí nástroje PLC coder vytvořen kód v jazyce SCL, který se poté importoval do projektu ve STEP7.

Jako vizualizační systém byl zvolen WinCC firmy Siemens. Pro tento SCADA systém má firma Ingeteam a.s. rovněž vytvořeny své standardy, které byly při tvorbě vizualizace využívány. Vizualizace byla členěna do několika obrazovek. První obrazovka byla obrazovkou hlavní, která sloužila pro ovládání hydraulické soustavy a pro parametrizaci řízení soustavy. Další obrazovky byly

obrazovky s grafy, ve kterých bylo možné sledovat průběhy procesních veličin a provádět jejich analýzu.

Porovnáním regulace s různými cykly OB35 bylo zjištěno, že příliš nízká doba cyklu, již nezvyšuje kvalitu regulace a má negativní vliv na dobu cyklu hlavní smyčky programu OB1, která je z tohoto důvodu často přerušována. Naopak příliš velká doba cyklu OB35 může vést až k nestabilnímu zpětnovazebnímu obvodu nebo v případě změny konstant regulátoru vede na zpomalení přechodového děje a v tom případě i na zhoršení kvality regulace. Během porovnávání se ukázalo, že vhodným nastavením doby cyklu OB35 lze docílit zkvalitnění regulace oproti nízkým dobám cyklu a navíc omezit vliv na době cyklu hlavní smyčky programu OB1.

Vzhledem k tomu, že řídicí systém WinLC RTX nepodporuje isochronní režim sběrnice Profibus DP, bylo pro testování tohoto režimu použito PLC S7-400. Výsledky byly porovnávány při stejné nastavené době cyklu OB35 a při stejné konstantní době cyklu sběrnice Profibus DP. Dle předpokladů se ukázalo, že isochronní režim sběrnice Profibus DP vykazoval vyšší kvalitu regulace nežli regulace prostřednictvím OB35.

Seznam použité literatury

- [1] Bosch Rexroth, spol. s.r.o. *Základy hydraulických systémů a základní hydraulické komponenty*. Brno, 2005.
- [2] Hydrostatika. <http://www.vscht.cz/>. [online]. [cit. 2015-09-02]. Dostupné z: <https://vscht.cz/uchi/ped/hydroplo/materialy/hydrostatika.pdf>
- [3] Vliv teploty na hydraulické oleje. <http://www.techmagazin.cz>. [online]. 15.7.2012 [cit. 2015-09-05]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/627>
- [4] 3 velké problémy způsobené vysokými provozními teplotami hydraulických systémů. <http://e-konstrukter.cz>. [online]. 3.10.2014 [cit. 2015-09-08]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/novinka/3-velke-problemy-zpusobene-vysokymi-provoznimi-teplotami-hydraulickych-systemu>
- [5] Ing. Roman. *Funkční schéma hydraulické soustavy 3-H-44 818*. : , 2011.
- [6] Nivotemp NT M-XP [online]. 2010. [cit. 2015-09-10]. ISBN . Dostupné z: http://www.buehler-technologies.com/fileadmin/ProduktPDFs/fluid/03_Niveau_u_Temperatur/de100213.pdf
- [7] Zbyněk Kania. *Teplota oleje a její důsledky* [online]. . [cit. 2015-09-12]. ISBN . Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/teplota-oleje-a-jeji-dusledky.html>
- [8] ARGO-HYTOS. *HD069-159* [online]. . [cit. 2015-09-14]. ISBN . Dostupné z: http://www.argohytos.com/fileadmin/user_upload/products/filtration/downloads/Katalog_HD049_4045_CZ_01.pdf
- [9] Systém pro ovládání a ochranu motorů SIMOCODE pro. <http://www1.siemens.cz>. [online]. [cit. 2015-09-18]. Dostupné z: <http://www1.siemens.cz/ad/current/?ctxnh=64fb2a2b9c&ctxp=home>
- [10] ARGO-HYTOS. *Directional Control Valves Solenoid Operated* [online]. 2011. [cit. 2015-09-22]. ISBN . Dostupné z: http://www.hydromarket.fi/files/PDF/AH_RPE3-06_2011.pdf
- [11] Barksdale. *OEM Transducer Series 623, 624, 625, 626, 627* [online]. 2016. [cit. 2016-04-04]. ISBN . Dostupné z: www.barksdale.com/download/?dl=548
- [12] Asco Všeobecné informace o proporčních ventilech. <http://www.oemautomatic.cz>. [online]. [cit. 2015-09-29]. Dostupné z: http://www.oemautomatic.cz/Products/Tlak_a_prtok/Ventily/Proporcionalni_ventily/Pro_rizeni_tlak_u/Asco_Vseobecne_informace_o_proporcionalnich_ventilech/2350523-310929.html
- [13] Rexroth Bosch Group. *4/2 and 4/3 proportional directional valves direct operated, with electrical position feedback, without/with integrated electronics (OBE)* [online]. 2015. [cit. 2015-10-12]. ISBN . Dostupné z: <http://www.hypox.fi/datasheets/4WRE.pdf>
- [14] Rexroth Bosch Group. Analog amplifier card for 4/3 proportional directional valves . <https://www.boschrexroth.com>. [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/us/products/product-groups/goto-products/goto-hydraulics/proportional-electronics/vt-vrpa2-t1/index>

- [15] Rexroth Bosch Group. *Valve amplifier for proportional directional valves Type VT-VRPA2* [online]. 2013. [cit. 2016-11-01]. ISBN . Dostupné z: http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/industrial_hydraulics_5/pdfs_4/re30119.pdf
- [16] WinCC. <https://www.elprocus.com>. [online]. [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/wp-content/uploads/2014/05/44.jpg>
- [17] SIMOCODE pro – Products for Smart Motor Management. <http://www.industry.siemens.com>. [online]. [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/safety-integrated/process-safety/products/safe-industrial-controls/tabcardpages/pages/products.aspx>
- [18] SIMATIC ET 200S. <http://w3.siemens.com>. [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/mcms/distributed-io/en/ip20-systems/et200s/pages/default.aspx>
- [19] S7-400/S7-400H/S7-400F/FH. <https://mall.industry.siemens.com>. [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/5000014>
- [20] Hydraulický válec. <http://www.amp-hydraulika.cz>. [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: http://www.amp-hydraulika.cz/images/hv_ph-1-amp.jpg
- [21] Ožana, Štěpán. *Navrhování a realizace regulátorů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 2 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2605-9.
- [22] Kolektiv autorů. *Automatizace a automatizační technika 2. Automatické řízení*. ISBN 978-80-251-4106-9, 241 stran, Computer Press, Brno, 2014.
- [23] doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.. *SIMULACE A MODELOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH SYSTÉMŮ* [online]. 2009. [cit. 2016-12-15]. ISBN . Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Simulace2009.pdf>
- [24] Simscape Fluids. <http://www.mathworks.com>. [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simhydraulics/?requestedDomain=www.mathworks.com>
- [25] 4-Way Directional Valve. <http://www.mathworks.com>. [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ref/4waydirectionalvalve.html>
- [26] Danfoss. *Axial piston open circuit pump* [online]. . [cit. 2016-02-01]. ISBN . Dostupné z: <http://files.danfoss.com/documents/series%2045%20axial%20piston%20open%20circuit%20pump%20technical%20information%20manual/520l0519.pdf>
- [27] Model an Isothermal Hydraulic Actuator. <http://www.mathworks.com>. [online]. [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ug/creating-a-simple-model.html>
- [28] Steve Miller . *Hydraulic Valve Parameters From Data Sheets and Experimental Data*. <http://nl.mathworks.com>. [online]. 2015 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: http://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27260-hydraulic-valve-parameters-from-data-sheets-and-experimental-data/all_files
- [29] *Teorie nelineárního řízení* [online]. . [cit. 2016-03-01]. ISBN . Dostupné z: http://matlab.fei.tuke.sk/ons/doc/TNR_skripta.pdf

- [30] Brázdil Michal. Identifikace a řízení nelineárního systému pomocí Hammersteinova modelu . <http://www.posterus.sk>. [online]. 25.4.2011 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=10422>
- [31] Zdeněk Babík . Využití Hammersteinova a Wienerova modelu při diskretním adaptivním řízení nelineárních procesů. <http://trilobit.fai.utb.cz>. [online]. 1.12.2012 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: http://trilobit.fai.utb.cz/vyuziti-hammersteinova-a-wienerova-modelu-pri-diskretnim-adaptivnim-rizeni-nelinearnich-procesu_079aeb04-15a5-45a1-9413-8cbcd4eb93c
- [32] Náповѣда programu STEP7
- [33] PLC SIMATIC S7-400. <http://www1.siemens.cz>. [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?ctxnh=e2c426f1f2>
- [34] Izochronní mód (Isochronous Mode). <http://plc-automatizace.cz>. [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://plc-automatizace.cz/knihovna/periferie/pristup/izochronni-mod.htm>
- [35] BORAN KILIÇ. *Dynamic modelling of a backhoe-loader* [online]. 2009. [cit. 2016-04-02]. ISBN . Dostupné z: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12611002/index.pdf>

Seznam příloh

Příloha A	Výpis scriptů pro optimalizaci parametrů proporcionálního ventilu	2 strany
Příloha B	Příloha B: Korekce parametrů proporcionálního ventilu	2 strany
Příloha C	Implementace linearizační funkce pro linearizaci statické charakteristiky	5 stran
Příloha D	Model soustavy	příloha na CD
Příloha E	Linearizace soustavy	příloha na CD
Příloha F	Katalogové listy výrobců	příloha na CD
Příloha G	Zhodnocení výsledků	příloha na CD

Příloha A: Výpis scriptů pro optimalizaci parametrů proporcionálního ventilu

Výpis scriptu find_valve_param_table_area_vs_disp_4way.m:

```
% Variable parameters
% x0 - vector initial values for orifice areas
% Q_r - vector of required flow rate at 11 valve displacements

init_opening = 0;
A_leak = 1e-9;
a_max = 5.9648;

% Vector of required flow rates. Read out from plot on page 8 in
% Eaton/Vickers Porportional Directional Valves catalog for KBFDG5V-10 valve
% Actual flow rates are determined at fixed instances of time by exporting
% flow rate measured at the external loop of the valve to MATLAB workspace.

Q_r = [0 0 1 3.2 7 12.5 20 28 36 44.5 52];    % [l/min]

% Set initial values
x0 = [0 0.005 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09]; % [cm^2]

% Optimization with fminunc
[x,fval,exitflag,output] = ...
    fminunc(@obj_find_valve_param_table_area_vs_disp_4way,x0, ...
    optimset('Tolx',1e-3,'Display','iter','LargeScale','off'),Q_r);
%
```

Výpis scriptu obj_find_valve_param_table_area_vs_disp_4way.m:

```
function F = obj_find_valve_param_table_area_vs_disp_4way(x,Q_r)
% Objective function to find out the required area vs. spool displacement
% relationship.
% Copyright 2010 MathWorks, Inc.

% x - vector of variable parameters. The vector is compiled of ten area
% values a_1 ... a_10, which are the cross-sectional areas of the valve
% orifice at 10 successive spool position s_1 ... s_10. The positions are
% set by shifting the spool from zero to its maximum opening at constant
% speed.

% Q_r - vector of required flow rates. Read out from plot on page 8 in
% Eaton/Vickers Porportional Directional Valves catalog for KBFDG5V-10 valve
% Actual flow rates are determined at fixed instances of time by exporting
```

```
% flow rate measured at the external loop of the valve to the MATLAB  
% workspace
```

```
% Assigning respective values of the variable parameters to valve  
% parameters via the workspace
```

```
assignin('base','a_1', x(1));  
assignin('base','a_2', x(2));  
assignin('base','a_3', x(3));  
assignin('base','a_4', x(4));  
assignin('base','a_5', x(5));  
assignin('base','a_6', x(6));  
assignin('base','a_7', x(7));  
assignin('base','a_8', x(8));  
assignin('base','a_9', x(9));  
assignin('base','a_10', x(10));
```

```
% If necessary, reset parameterization to second option (table)  
model = 'valve_testrig_flow_char_4way';  
load_system(model);  
blkpth = find_system(bdroot,'ClassName','valve_dir_4_way');  
set_param(char(blkpth),'mdl_type','2');  
sim(model);
```

```
k = [1 1 1 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2];    % Weight multipliers
```

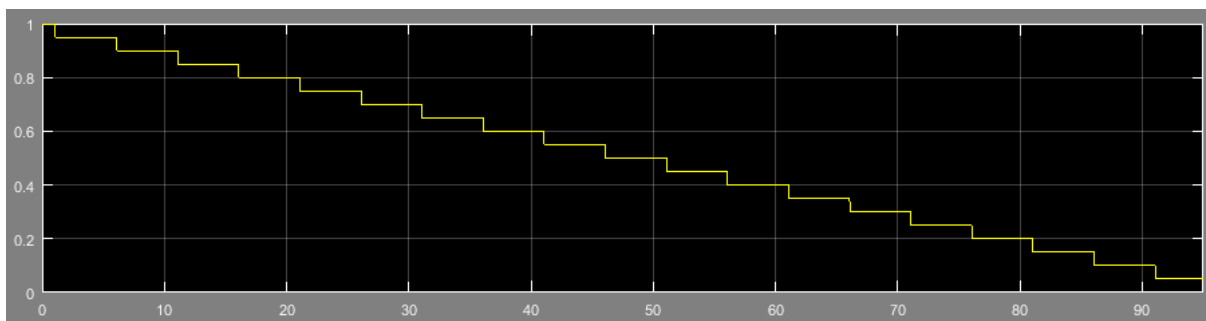
```
% Computing objective function
```

```
F = 0;  
for j = 1:11  
    F = F + k(j) * (yout(j) - Q_r(j))^2;  
end  
end
```

```
% EOF
```

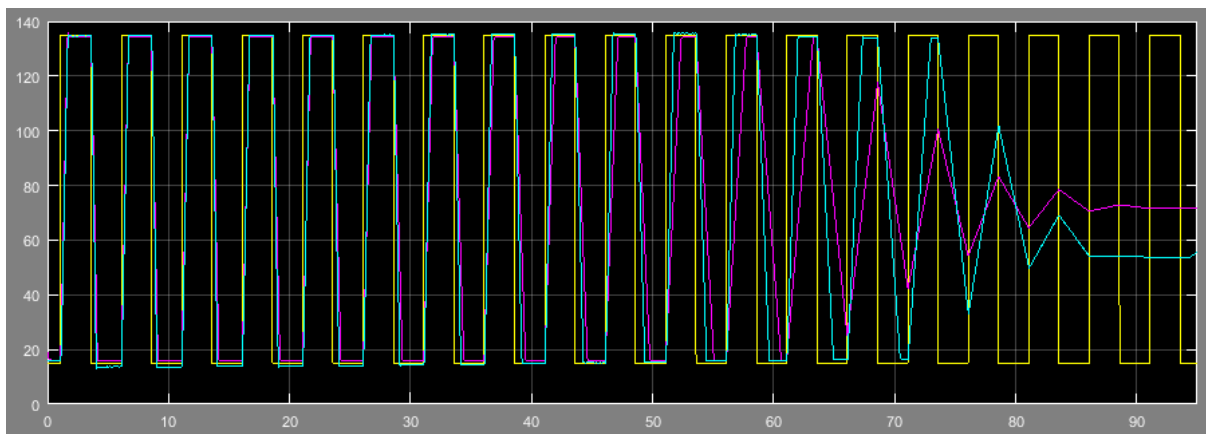
Příloha B: Korekce parametrů proporcionálního ventilu

Na obr.B1 je vidět průběh kladné saturační úrovně akčního zásahu v závislosti na čase. Průběh záporné saturační úrovně odpovídá kladné saturační úrovni vynásobené konstantou -1.



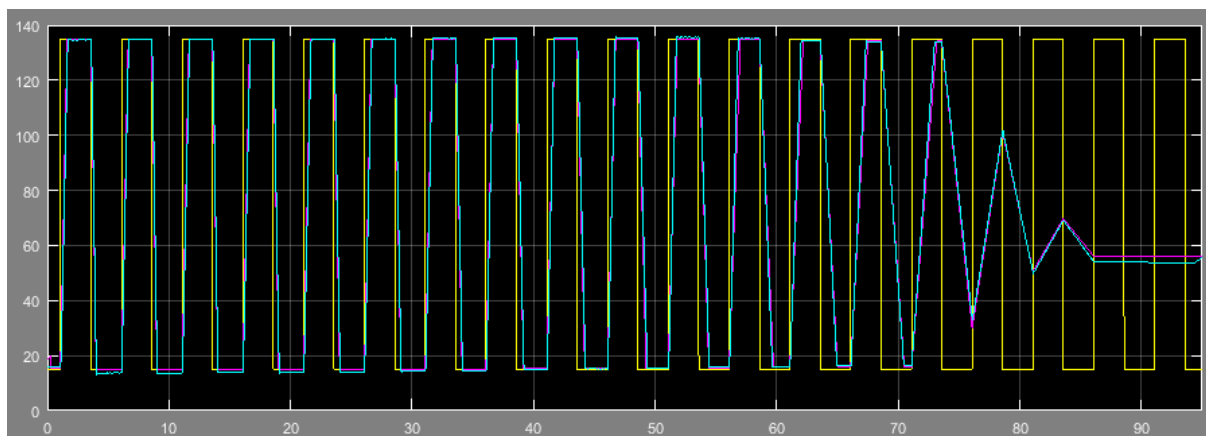
Obr. B1: Průběh kladné úrovně saturace akčního zásahu.

Na obr. B2 je průběh polohy pístu hydraulického válce ještě před ruční korekcí proporcionálního ventilu. Modrá křivka představuje změřený průběh na reálné soustavě a fialová představuje průběh modelu. Žlutá křivka znázorňuje žádanou pozici pístu hydraulického válce. Z grafu je patrné, že zhruba od času 40s (saturace akčního zásahu na úrovni 0.55) dochází k značným rozdílům mezi modelem a reálnou soustavou.



Obr. B2: Poloha pístu hydraulického válce před ruční korekcí proporcionálního ventilu.

Tyto rozdíly jsou potlačeny korekcí průchozích ploch ventilu. Vliv změny je patrný z obr. B3.

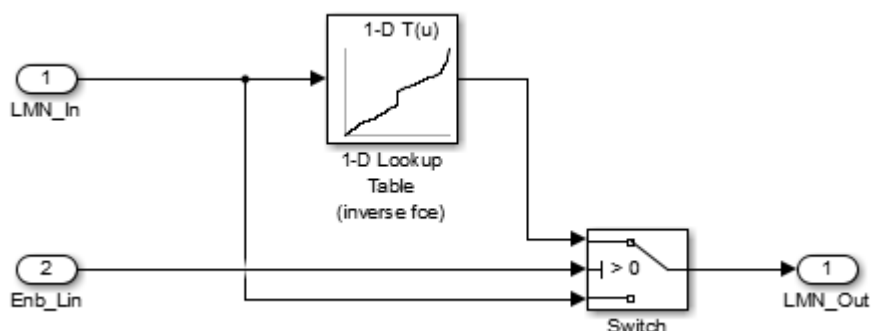


Obr. B3: Poloha pístu hydraulického válce po ruční korekci proporcionálního ventilu.

Příloha C: Implementace linearizační funkce pro linearizaci statické charakteristiky

Na obr. C1 je vidět schéma v Simulinku, jež slouží pro linearizaci statické charakteristiky hydraulické soustavy. Schéma má dva vstupy. Prvním je *Enb_Lin*, jež slouží pro aktivaci linearizační funkce a druhým vstupem je *LMN_In*. Na tento vstup je přiveden akční zásah vypočtený regulátorem. Blok *fcn* je linearizační funkce, jejíž průběh je znázorněn na obr. 59.

Z nástroje *Curve Fitting Tool* byl vyexportován *cfit* objekt, jehož data byla dosazena do bloku *1-D Lookup Table* na obr. C1.



Obr. C1: Schéma pro linearizaci statické charakteristiky hydraulické soustavy.

Toto schéma je samozřejmě možné rovnou implementovat v prostředí určeném pro programování PLC. Nicméně je-li toto schéma již vytvořeno, efektivnější způsob implementace je vygenerování zdrojového kódu ze schématu na obr. C1. Simulink obsahuje nástroj *PLC coder*, jež umožňuje vytvoření zdrojového kódu pro PLC ze schématu v simulinku. Podmínkou pro vytvoření zdrojového kódu ze schématu je, že jednotlivé prvky musejí být atomické.

Po vygenerování kódu se vytvoří soubor vytvořený v jazyce SCL, který je nutné nainportovat do programovacího prostředí pro PLC a zkompilovat.

Výpis kódu v jazyce SCL vytvořený nástrojem *PLC coder*:

```
FUNCTION_BLOCK LinStatChar
VAR_INPUT
    LMN_In: REAL;
    Enb_Lin: BOOL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    LMN_Out: REAL;
END_VAR
VAR
    DLookupTableinverse: ARRAY [0..200] OF REAL := [-73.420898170472853,-
72.630267519276217,-71.836265352991646,
```

-71.029012282803961,-70.221759212616277,-69.414506142428579,-68.6072530722409,-
67.806061485975135,-67.023274173567913,
-66.2404868611607,-65.4576995487535,-64.674912236346273,-63.900690140840844,-
63.180055675630037,-62.459421210419237,
-61.738786745208429,-61.018152279997629,-60.297517814786822,-59.390252639314554,-
58.351756605795288,-57.313260572276029,
-56.274764538756763,-55.243792611057039,-54.215527599962456,-53.187262588867881,-
52.1589975777733,-51.531234834258761,
-50.976727901323308,-50.422220968387848,-49.867714035452387,-49.313207102516934,-
48.758700169581473,-48.204193236646013,
-47.7876896469402,-47.451626387202964,-47.115563127465727,-46.779499867728489,-
46.443436607991245,-46.107373348254008,
-45.771310088516771,-45.435246828779526,-45.099183569042289,-44.763120309305052,-
44.427057049567814,-44.090993789830577,
-43.755493026081488,-43.420201115935207,-43.084909205788925,-42.749617295642651,-
42.414325385496369,-42.079033475350087,
-41.743741565203806,-41.408449655057524,-41.073157744911242,-40.73786583476496,-
40.402573924618686,-40.067282014472404,
-39.507498864085164,-38.891358754053428,-38.2752186440217,-37.65907853398997,-
37.042938423958233,-36.4267983139265,
-35.822132983052377,-35.243333131950244,-34.664533280848104,-34.085733429745964,-
33.506933578643824,-32.928133727541692,
-32.349333876439552,-31.746378160906826,-31.106648096703477,-30.466918032500125,-
29.827187968296776,-29.187457904093428,
-28.547727839890076,-27.866330822678908,-26.936872953285903,-26.007415083892898,-
25.077957214499893,-24.148499345106885,
-23.474183623988907,-22.848383209061655,-22.222582794134407,-21.596782379207159,-
20.970981964279911,-20.345181549352663,
-19.772199461572779,-19.264187745480534,-18.756176029388286,-18.248164313296041,-
17.740152597203796,-17.232140881111548,
-16.7241291650193,-16.216117448927054,-15.51304764909241,-14.66555755673059,-
13.818067464368767,-12.970577372006947,
-12.123087279645125,-
7.8671765499020072,12.203637776581642,13.162688023235066,14.121738269888491,15.0807885
16541915,

16.020062263941906,16.503027035904694,16.985991807867485,17.468956579830273,17.9519213
51793061,18.434886123755849,18.91785089571864,

19.400815667681428,19.883780439644219,20.286039682336515,20.662723782305076,21.0394078
82273636,21.416091982242193,21.792776082210754,

22.169460182179311,22.546144282147871,22.922828382116428,23.299512482084989,23.6761965
82053549,24.057247194613296,24.465035202521747,

24.872823210430195,25.280611218338645,25.688399226247093,26.09618723415554,26.50397524
2063991,26.911763249972438,27.319551257880885,

27.727339265789336,28.143950471749033,28.578365186896079,29.012779902043121,29.4471946
17190167,29.881609332337213,30.316024047484255,

30.750438762631298,31.184853477778343,31.619268192925386,32.059232292030984,32.5385539
27055446,33.0178755620799,33.497197197104363,

33.976518832128818,34.45584046715328,34.935162102177742,35.4144837372022,35.8938053722
26659,36.439879318798511,37.004951452958046,

37.570023587117582,38.135095721277111,38.700167855436639,39.265239989596175,39.8303121
23755711,40.235601533469293,40.572316662267596,

40.9090317910659,41.24574691986421,41.582462048662514,41.919177177460817,42.2558923062
59121,42.592607435057424,42.929322563855727,

43.266037692654038,43.602752821452341,43.939467950250645,44.357959527903404,44.7943743
47224078,45.23078916654476,45.667203985865434,

46.103618805186109,46.54003362450679,46.976448443827465,47.412863263148147,47.84927808
2468821,48.57231170437398,49.446555717770956,

50.320799731167938,51.1950437445649,52.14467244642745,53.970088997822927,55.7955055492
18412,57.854714383763167,59.943418296770659,

61.4711065559202,62.983174090547926,64.616379465675166,66.498304028716589,68.446531456
46312,70.656619109796409,72.961558654112267,

75.413517032440126,82.487899508664427,83.0997280118419,96.19428575943293,100.101077081
19162];

DLookupTableinver_a: ARRAY [0..200] OF REAL := [-100.0,-99.0,-98.0,-97.0,-96.0,-95.0,-94.0,-
93.0,-92.0,-91.0,-90.0,-89.0,-88.0,

-87.0,-86.0,-85.0,-84.0,-83.0,-82.0,-81.0,-80.0,-79.0,-78.0,-77.0,-76.0,-75.0,-74.0,-73.0,-72.0,-
71.0,-70.0,-69.0,-68.0,

-67.0,-66.0,-65.0,-64.0,-63.0,-62.0,-61.0,-60.0,-59.0,-58.0,-57.0,-56.0,-55.0,-54.0,-53.0,-52.0,-
51.0,-50.0,-49.0,-48.0,

-47.0,-46.0,-45.0,-44.0,-43.0,-42.0,-41.0,-40.0,-39.0,-38.0,-37.0,-36.0,-35.0,-34.0,-33.0,-32.0,-
31.0,-30.0,-29.0,-28.0,

-27.0,-26.0,-25.0,-24.0,-23.0,-22.0,-21.0,-20.0,-19.0,-18.0,-17.0,-16.0,-15.0,-14.0,-13.0,-12.0,-
11.0,-10.0,-9.0,-8.0,

-7.0,-6.0,-5.0,-4.0,-3.0,-2.0,-

1.0,0.0,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0,8.0,9.0,10.0,11.0,12.0,13.0,14.0,15.0,16.0,17.0,

18.0,19.0,20.0,21.0,22.0,23.0,24.0,25.0,26.0,27.0,28.0,29.0,30.0,31.0,32.0,33.0,34.0,35.0,36.0,37.0,38
.0,39.0,40.0,

41.0,42.0,43.0,44.0,45.0,46.0,47.0,48.0,49.0,50.0,51.0,52.0,53.0,54.0,55.0,56.0,57.0,58.0,59.0,60.0,61
.0,62.0,63.0,

64.0,65.0,66.0,67.0,68.0,69.0,70.0,71.0,72.0,73.0,74.0,75.0,76.0,77.0,78.0,79.0,80.0,81.0,82.0,83.0,84
.0,85.0,86.0,

87.0,88.0,89.0,90.0,91.0,92.0,93.0,94.0,95.0,96.0,97.0,98.0,99.0,100.0];

frac: REAL;

iRight: DINT;

iLeft: DINT;

bpIdx: DINT;

END_VAR

(* Switch: '<S1>/Switch' incorporates:

* Inport: '<Root>/Enb_Lin' *)

IF Enb_Lin THEN

(* Lookup_n-D: '<S1>/1-D Lookup Table (inverse fce)' incorporates:

* Inport: '<Root>/LMN_In' *)

(* Lookup 1-D

Search method: 'binary'

Use previous index: 'off'

Interpolation method: 'Linear'

Extrapolation method: 'Linear'

Use last breakpoint for index at or above upper limit: 'off'

Remove protection against out-of-range input in generated code: 'off' *)

(* Prelookup - Index and Fraction

Index Search method: 'binary'

Extrapolation method: 'Linear'

Use previous index: 'off'

Use last breakpoint for index at or above upper limit: 'off'

Remove protection against out-of-range input in generated code: 'off' *)

IF LMN_In <= -100.0 THEN

iLeft := 0;

frac := LMN_In - -100.0;

ELSIF LMN_In < 100.0 THEN

(* Binary Search *)

bpIdx := 100;

iLeft := 0;

iRight := 200;

WHILE (iRight - iLeft) > 1 DO

IF LMN_In < DLookupTableinver_a[bpIdx] THEN

iRight := bpIdx;

ELSE

iLeft := bpIdx;

END_IF;

bpIdx := DWORD_TO_DINT(SHR(IN:=DINT_TO_DWORD(iRight + iLeft), N:=1));

END_WHILE;

frac := (LMN_In - DLookupTableinver_a[iLeft]) / (DLookupTableinver_a[iLeft + 1] -

DLookupTableinver_a[iLeft]);

ELSE

iLeft := 199;

frac := LMN_In - 99.0;

END_IF;

(* Outport: '<Root>/LMN_Out' incorporates:

* Lookup_n-D: '<S1>/1-D Lookup Table (inverse fce)' *)

(* Interpolation 1-D

Interpolation method: 'Linear'

Use last breakpoint for index at or above upper limit: 'off'

Overflow mode: 'wrapping' *)

LMN_Out := ((DLookupTableinverse[iLeft + 1] - DLookupTableinverse[iLeft]) * frac) +

DLookupTableinverse[iLeft];

ELSE

(* Outport: '<Root>/LMN_Out' incorporates:

* Inport: '<Root>/LMN_In' *)

LMN_Out := LMN_In;

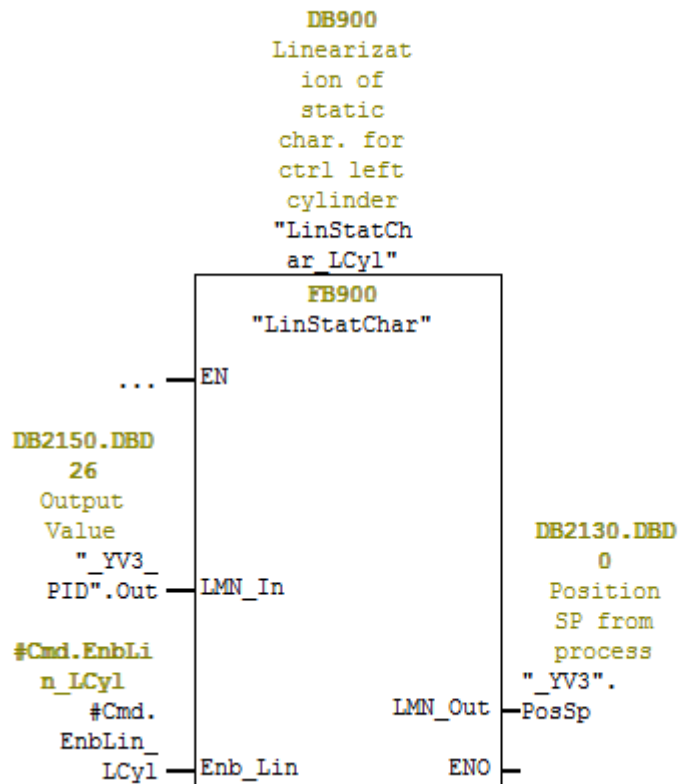
END_IF;

(* End of Switch: '<S1>/Switch' *)

END_FUNCTION_BLOCK

Po kompilaci tohoto kódu se vytvoří nový FB. Tento blok je poté možné přímo implementovat, jak je znázorněno na obr. XX.

Network 27: Linearization of static characteristic - Left cylinder



Obr. XX: Implementace FB pro linearizaci statické charakteristiky.